

# **Materiales compuestos: Modelaje y estudio de una motora de 5,8 metros de eslora.**

## **Trabajo Final de Grado**



Facultat de Nàutica de Barcelona  
Universitat Politècnica de Catalunya

Trabajo realizado por:  
**Luis Miguel Soto Piracés**

Dirigido por:  
**Jordi Torralbo Gavilán**

Grado en Ingeniería en Sistemas y Tecnología Naval

Barcelona, 10 octubre de 2019

Departamento de Ciencia e Ingenierías Náuticas



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

Facultat de Nàutica de Barcelona







---

## Resumen

Este proyecto está constituido por tres grandes bloques. El primer capítulo aborda una introducción al ámbito de los materiales compuestos, reparando especial atención aquellos que están conformados por una matriz polimérica. El principal objetivo es analizar con detenimiento los refuerzos y resinas más comunes en la náutica de recreo para posteriormente realizar una comparativa sólida.

El segundo bloque expone la importancia de poseer un buen manejo de herramientas de diseño. En él se lleva a cabo el modelaje de una embarcación mediante el uso de programas *CAD* y *CFD* tales como *Rhinoceros* y *Maxsurf*.

Finalmente, el apartado final somete a estudio el modelo diseñado. La finalidad es dimensionar adecuadamente parámetros sumamente importantes como el escantillado mínimo requerido, la resistencia al avance y la estabilidad de la embarcación. Todos estos conceptos han sido estudiados bajo normativa para tratar de elaborar un trabajo lo más realista posible.

## Abstract

This project is divided in three blocks. The first chapter is an introduction to the field of composite materials, paying special attention to those that are made up of a polymer matrix. The main objective is to analyze the most common reinforcements and resins used in recreational boating and then develop an objective comparison.

The second part exposes the importance of having a good handling of design tools. The aim is to design a motorboat using *CAD* and *CFD* programs such as *Rhinoceros* and *Maxsurf*.

Finally, the last chapter evaluates the designed model. The aim is to calculate correctly important parameters like the minimum hull thickness, the resistance to advance and the stability of the boat. The ISO regulations have been applied to study all these concepts. The purpose is to try to create a project as realistic as possible.

---

## Tabla de contenidos

RESUMEN .....	III
ABSTRACT .....	IV
TABLA DE CONTENIDOS .....	V
LISTA DE FIGURAS .....	VII
LISTA DE TABLAS .....	IX
<b>CAPÍTULO 0 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
ESTRUCTURACIÓN DEL TRABAJO .....	1
<b>CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN A LOS MATERIALES COMPUESTOS .....</b>	<b>3</b>
1. MATRICES .....	4
1.1 MATRICES METÁLICAS .....	6
1.2 MATRICES CERÁMICAS .....	9
1.3 MATRICES ORGÁNICAS TERMOESTABLES .....	12
1.3.1 RESINAS EPOXI .....	14
1.3.2 RESINAS POLIÉSTER .....	17
1.3.3 RESINAS VINILÉSTER .....	21
1.4 COMPARATIVA DE MATRICES TERMOESTABLES .....	23
1.5 AGENTES DE CURADO .....	28
1.6 EL PROCESO DE CURADO .....	30
2. MATERIALES DE REFUERZO .....	33
2.1 FIBRA DE VIDRIO .....	35
2.1.1 PROCESADO DE LA FIBRA DE VIDRIO .....	38
2.1.2 CLASES DE FIBRA DE VIDRIO .....	39
2.2 FIBRA DE CARBONO .....	41
2.2.1 PROCESADO DE LA FIBRA DE CARBONO .....	43
2.2.2 CLASES DE FIBRA DE CARBONO .....	44
2.3 FIBRA ARAMÍDICA .....	45
2.3.1 PROCESADO DE LA FIBRA ARAMÍDICA .....	47
2.3.2 CLASES DE FIBRA ARAMIDA .....	47
2.4 COMPARATIVA DE LOS MATERIALES DE REFUERZO .....	47
3. FORMATOS TEXTILES .....	49
3.1 FIELTROS .....	50
3.2 TEJIDOS .....	52
3.3 ENSAMBLADOS .....	54
<b>CAPÍTULO 2 MODELADO DE LA EMBARCACIÓN .....</b>	<b>55</b>
1. ELECCIÓN DEL MODELO .....	55
2. MODELADO DE LA EMBARCACIÓN .....	59
2.1. MODELADO DEL CASCO .....	60
2.2. MODELADO DE LA CABINA .....	66
2.3. MODELADO DEL PANEL DE CONTROL .....	72
2.4. MODELADO DE LOS DETALLES Y RENDERIZADO FINAL DE LA MOTORA .....	82
2.5. ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS DEL CASCO MEDIANTE MAXSURF .....	84
<b>CAPÍTULO 3 EVALUACIÓN DE LA MOTORA .....</b>	<b>89</b>
1. DETERMINACIÓN DEL ESCANTILLONADO, ISO 12215 .....	89
1.1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN DE LA NORMA .....	90
1.2 DIMENSIONES Y DATOS .....	91
1.3 DISTRIBUCIÓN DE LOS PANELES .....	92
1.4 FACTORES DE AJUSTE DE PRESIÓN .....	94
1.4.1 FACTOR DE CATEGORÍA DE DISEÑO KDC .....	94
1.4.2 FACTOR DE CARGA DINÁMICA NCG PARA EMBARCACIONES PLANEADORAS A MOTOR .....	95

1.4.3 FACTOR LONGITUDINAL DE DISTRIBUCIÓN DE PRESIÓN KL.....	96
1.4.4 FACTOR DE REDUCCIÓN DE PRESIÓN SEGÚN LA SUPERFICIE KAR .....	96
1.4.5 FACTOR DE REDUCCIÓN DE PRESIÓN KZ EN EL COSTADO .....	98
1.5 PRESIONES DE DISEÑO.....	98
1.5.1 PRESIÓN EN LOS FONDOS PARA LAS EMBARCACIONES A MOTOR EN MODALIDAD DESPLAZAMIENTO PBMD .....	98
1.5.2 PRESIÓN EN LOS FONDOS PARA LAS EMBARCACIONES A MOTOR EN MODALIDAD DE PLANEOPBMP .....	99
1.5.3 PRESIÓN EN EL COSTADO PARA LAS EMBARCACIONES A MOTOR EN MODALIDAD DESPLAZAMIENTO PSMD.....	99
1.5.4 PRESIÓN EN EL COSTADO PARA LAS EMBARCACIONES A MOTOR EN MODALIDAD DE PLANEOPSPM:.....	100
1.6 ESCANTILLONADO MÍNIMO REQUERIDO .....	100
1.6.1 FACTOR DE CORRECCIÓN DE CURVATURA KC.....	102
1.6.2 FACTOR DE ALARGAMIENTO DEL PANEL POR RESISTENCIA A LA FLEXIÓN K2 .....	103
1.6.3 TENSIÓN DE DISEÑO $\Sigma D$ PARA UN PANEL DE FIBRA DE REFORZADA .....	104
1.6.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....	105
1.7 ESCANTILLONADO PROPUESTO .....	107
2 RESISTENCIA AL AVANCE .....	108
2.1 RESISTENCIA POR FRICCIÓN.....	110
2.2 RESISTENCIA POR PRESIÓN DE ORIGEN VISCOSO .....	111
2.3 RESISTENCIA VISCOSA.....	113
2.4 RESISTENCIA POR FORMACIÓN DE OLAS .....	113
2.5 CÁLCULO DE LA RESISTENCIA AL AVANCE .....	113
2.6 CÁLCULO DE LA RESISTENCIA AL AVANCE MEDIANTE MAXSURF RESISTANCE .....	115
2.7 METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE LA RESISTENCIA AL AVANCE MEDIANTE HOJA EXCEL .....	119
2.8 CÁLCULO DE LA RESISTENCIA AL AVANCE MEDIANTE HOJA EXCEL.....	123
2.9 DETERMINACIÓN DEL SISTEMA DE PROPULSIÓN .....	126
2.10 DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA MÁXIMA DEL MOTOR, APLICACIÓN DE LA ISO 11592.....	127
2.11 ELECCIÓN DEL MOTOR PRINCIPAL.....	128
2.12 AUTONOMÍA DE LA EMBARCACIÓN .....	131
3 DISPOSICIÓN GENERAL.....	133
3.1 ESPACIO DE BAÑERA.....	133
3.2 ZONA DE CABINA .....	134
4 ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD, ISO 12217 .....	134
4.1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN .....	135
4.2 ENSAYOS A APLICAR A LAS EMBARCACIONES NO PROPULSADAS A VELA .....	135
4.3 ENSAYO DE ALTURA DE INUNDACIÓN REQUERIDA .....	137
4.3.1 FACTOR DE POSICIÓN DE LA ABERTURA F1.....	137
4.3.2 FACTOR DE TAMAÑO DE LA ABERTURA F2 .....	138
4.3.3 FACTOR DE TAMAÑO DEL NICHOP, F3 .....	139
4.3.4 FACTOR DE DESPLAZAMIENTO F4 .....	140
4.3.5 FACTOR DE FLOTACIÓN F5 .....	140
4.3.6 ALTURA DE INUNDACIÓN REQUERIDA .....	141
4.4 ENSAYO DE COMPENSACIÓN DE CARGA .....	141
4.4.1 APLICACIÓN DE MAXSURF STABILITY .....	145
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>149</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>151</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>155</b>



---

# Lista de figuras

## CAPÍTULO 1

FIGURA 1.1 MATRIZ Y REFUERZO DEL MATERIAL COMPUESTO. FUENTE: WWW.GRUPOCARMAN.COM...	3
FIGURA 1.2 HERRAMIENTAS DE MECANIZADO DE CERMET. FUENTE: WWW.INCAMETAL.COM .....	7
FIGURA 1.3 REFUERZOS EMPLEADOS PARA MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ METÁLICA. FUENTE: REVISTA DE METALURGIA (2000) .....	7
FIGURA 1.4 HORMIGÓN ARMADO. FUENTE: WWW.INGENIEROSDECAMINOS.COM .....	10
FIGURA 1.5 CLASIFICACIÓN DE LAS MATRICES TERMOESTABLES EN FUNCIÓN DE SU TEMPERATURA DE EMPLEO FUENTE: MIRAVETE (2007) .....	13
FIGURA 1.6 UNIÓN ENTRE POLINES Y BANCADA. FUENTE: WWW.SINTEMAR.COM .....	16
FIGURA 1.7 APLICACIÓN DE RESINA EPOXI. FUENTE: WWW.SINTEMAR.COM .....	16
FIGURA 1.8 APLICACIÓN DEL GELCOAT BLANCO SOBRE EL MOLDE. FUENTE: DRASSANES DALMAU .....	21
FIGURA 1.9 BIDÓN DE RESINA VINILÉSTER. FUENTE: DRASSANES DALMAU .....	23
FIGURA 1.10 GRÁFICOS PROPIEDADES MECÁNICAS. FUENTE: PROPIA .....	25
FIGURA 1. 11 AGENTE DE CURADO. FUENTE: DRASSANES DALMAU .....	30
FIGURA 1.12 CICLO DE CURADO DE UNA RESINA. FUENTE: MIRAVETE (2007) .....	31
FIGURA 1.13 RESINA POLIÉSTER Y SU CATALIZADOR (MEK). FUENTE: WWW.NAVALCOMPOSITES.COM.32	
FIGURA 1.14 CONFIGURACIONES DEL MATERIAL DE REFUERZO. FUENTE: BALDENEBRO (2015) .....	33
FIGURA 1.15 MÁQUINA DE PROYECCIÓN SIMULTÁNEA.. FUENTE: DRASSANES DALMAU .....	34
FIGURA 1.16 TIPOS DE FIBRAS DE ORIGEN MINERAL. FUENTE: PROPIA .....	35
FIGURA 1.17 TEJIDO DE FIBRA DE VIDRIO. FUENTE: DRASSANES DALMAU .....	36
FIGURA 1.18 PROCESADO DE LA FIBRA DE VIDRIO FUENTE: SMITH (2006) .....	38
FIGURA 1.19 APLICACIÓN DE LAS SUCESIVAS CAPAS DE FIBRA DE VIDRIO SOBE EL MOLDE. FUENTE: DRASSANES DALMAU .....	41
FIGURA 1.20 ASTA DE FIBRA DE CARBONO. FUENTE: DRASSANES DALMAU .....	42
FIGURA 1.21 GUANTE DE PROTECCIÓN MECÁNICA DE KEVLAR. FUENTE: WWW.DUPONT.ES .....	46
FIGURA 1.22 ROLLOS DE MAT 300 Y MAT 600. FUENTE: DRASSANES DALMAU .....	51
FIGURA 1.23 TEJIDO DE FIBRA DE CARBONO. FUENTE: DRASSANES DALMAU .....	52
FIGURA 1.24 TELA. FUENTE: POVEDA .....	53
FIGURA 1.25 SATÉN. FUENTE: POVEDA .....	53
FIGURA 1. 26 SARGA. FUENTE: POVEDA .....	54

## CAPÍTULO 2

FIGURA 2.1 PARAMETRIZACIÓN Y COLOCACIÓN DE LOS PLANOS. FUENTE: PROPIA .....	60
FIGURA 2.2 CALCO DE CUADERNAS Y LÍNEAS DE FLOTACIÓN. FUENTE: PROPIA .....	62
FIGURA 2.3 CASCO DE LA EMBARCACIÓN. FUENTE: PROPIA .....	62
FIGURA 2.4 PROLONGACIÓN DEL CASCO DE LA EMBARCACIÓN. FUENTE: PROPIA .....	63
FIGURA 2.5 GENERACIÓN DEL ESPEJO DE POPA. FUENTE: PROPIA .....	64
FIGURA 2.6 SUPERFICIE INTERIOR DEL CASCO Y SUPERFICIE DE TRANSICIÓN. FUENTE: PROPIA .....	65
FIGURA 2.7 TRAZADO DEL BORDE SUPERIOR DE LA CABINA. FUENTE: PROPIA .....	67
FIGURA 2.8 CONSTRUCCIÓN DE LA CABINA. FUENTE: PROPIA .....	67
FIGURA 2.9 CONTORNO DE LA BAÑERA I. FUENTE: PROPIA .....	69
FIGURA 2.10 CONTORNO DE LA BAÑERA II. FUENTE: PROPIA .....	69
FIGURA 2.11 CIERRE DE LA CABINA. FUENTE: PROPIA .....	70
FIGURA 2.12 MODELAJE DE LA MOTORA. FUENTE: PROPIA .....	72
FIGURA 2.13 MODELADO DEL SALPICADERO. FUENTE: PROPIA .....	73
FIGURA 2.14 EXTRUSIÓN Y ACABADOS DEL SALPICADERO. FUENTE: PROPIA .....	73

FIGURA 2.15 FINALIZACIÓN DEL SALPICADERO. FUENTE: PROPIA .....	74
FIGURA 2.16 SECCIÓN TRANSVERSAL DEL INDICADOR. FUENTE: PROPIA .....	76
FIGURA 2.17 INDICADOR DEL PANEL DE CONTROL. FUENTE: PROPIA .....	77
FIGURA 2.18 PERFIL DEL MANDO A DISTANCIA. FUENTE: PROPIA.....	78
FIGURA 2.19 MANDO A DISTANCIA DE LA MOTORA. FUENTE: PROPIA.....	79
FIGURA 2.20 DISEÑO DE LA RUEDA DE TIMÓN. FUENTE: PROPIA .....	80
FIGURA 2.21 ELEMENTOS DE GOBIERNO DE LA MOTORA. FUENTE: PROPIA .....	82
FIGURA 2.22 MOTORA CABALLERO SIN RENDERIZAR. FUENTE: PROPIA .....	83
FIGURA 2.23 MOTORA CABALLERO RENDERIZADA. FUENTE: PROPIA .....	83
FIGURA 2.24 COLOCACIÓN DE LAS VISTAS EN RHINOCEROS. FUENTE: PROPIA .....	84
FIGURA 2.25 DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA EMBARCACIÓN. FUENTE: PROPIA.....	85
FIGURA 2.26 GENERACIÓN DE LA SIMETRÍA DEL CASCO EN MAXSURF. FUENTE: PROPIA .....	86
FIGURA 2.27 INSERCIÓN DE LAS REFERENCIAS Y CALADO DE LA MOTORA. FUENTE: PROPIA .....	86
FIGURA 2.28 PARÁMETROS OBTENIDOS A PARTIR DE MAXSURF. FUENTE: PROPIA .....	87

### CAPÍTULO 3

FIGURA 3.1 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS BC Y B0,4. FUENTE: ISO 12215-5:2008 .....	91
FIGURA 3.2 DISTRIBUCIÓN FINAL DE LOS PANELES. FUENTE: PROPIA.....	93
FIGURA 3.3 UBICACIÓN DE LAS CUADERNAS Y LOS REFUERZOS LONGITUDINALES. FUENTE: PROPIA .....	94
FIGURA 3.4 MEDICIÓN DE LA CURVATURA DE UN PANEL. FUENTE: ISO 12215-5:2008 .....	102
FIGURA 3.5 DESCOMPOSICIÓN DE LA RESISTENCIA AL AVANCE. FUENTE: APUNTES DE LA ASIGNATURA DE PROPULSORES. ....	110
FIGURA 3.6 DISTRIBUCIÓN PRESIONES DE ORIGEN VISCOSO. FUENTE: APUNTES DE LA ASIGNATURA DE PROPULSORES.....	112
FIGURA 3.7 SELECCIÓN DEL MÉTODO PARA EL CÁLCULO DE LA RESISTENCIA AL AVANCE. FUENTE: PROPIA.....	115
FIGURA 3.8 GRÁFICO POTENCIA & RESISTENCIA AL AVANCE VS VELOCIDAD MEDIANTE MAXSURF RESISTANCE. FUENTE: PROPIA.....	117
FIGURA 3.9 TRIMADO DE LA EMBARCACIÓN MEDIANTE MAXSURF RESISTANCE. FUENTE: PROPIA .....	119
FIGURA 3.10 PARÁMETROS DEL MÉTODO SAVITSKY. FUENTE: LARSSON & ELIASSEN (2000) .....	120
FIGURA 3.11 OBTENCIÓN DE $\Delta\lambda$ EN FUNCIÓN DE T Y B. FUENTE: LARSSON & ELIASSEN (2000).....	121
FIGURA 3.12 GRÁFICO POTENCIA & RESISTENCIA AL AVANCE VS VELOCIDAD MEDIANTE HOJA DE CÁLCULO. FUENTE: PROPIA .....	125
FIGURA 3.13 OBTENCIÓN DE LA POTENCIA MÁXIMA EN FUNCIÓN DE $\lambda$ . FUENTE: ISO 11592-1:2001...	128
FIGURA 3.14 MOTOR FUERABORDA E-TEC 60 CV. FUENTE: WWW.EVINRUDE.COM .....	131
FIGURA 3.15 CONSUMOS DEL MOTOR E-TEC 60 CV. FUENTE: WWW.EVINRUDE.COM .....	132
FIGURA 3.16 INTRODUCCIÓN DE LOS PESOS EN MAXSURF STABILITY. FUENTE: PROPIA.....	145
FIGURA 3.17 ESTABILIDAD DE LA MOTORA. FUENTE: PROPIA.....	146
FIGURA 3.18 MEDICIÓN DEL FRANCO BORDO EN SITUACIÓN DE MÁXIMA CARGA. FUENTE: PROPIA ...	147

---

# Lista de tablas

## CAPÍTULO 1

TABLA 1.1 CONSTITUYENTES DE LOS MATERIALES COMPUESTOS. FUENTE: PROPIA .....	4
TABLA 1.2 CLASIFICACIÓN DE LAS MATRICES EMPLEADAS EN LOS MATERIALES COMPUESTOS. FUENTE: MIRAVETE (2007) .....	5
TABLA 1.3 CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES DE REFUERZO DE MATRIZ METÁLICA. FUENTE: REVISTA DE METALURGIA (2000) .....	8
TABLA 1.4 APLICACIONES DE LAS MATRICES METÁLICAS. FUENTE: APLICACIONES DE LOS MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ METÁLICA EN EL SECTOR ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO (2005) .....	9
TABLA 1.5 CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ METÁLICA SEGÚN EL MATERIAL DE REFUERZO. FUENTE: MIRAVETE (2007) .....	11
TABLA 1.6 MATRICES ORGÁNICAS. FUENTE: PROPIA .....	12
TABLA 1.7 GENERALIDADES DE LAS RESINAS EPOXI. FUENTE: PROPIA .....	15
TABLA 1.8 VENTAJAS DE LA RESINA EPOXI EMPLEADA PARA LA FIJACIÓN DE MAQUINARIA. FUENTE: WWW.SINTEMAR.COM .....	17
TABLA 1.9 GENERALIDADES DE LAS RESINAS POLIÉSTER. FUENTE: PROPIA .....	19
TABLA 1.10 PROPIEDADES DE LAS RESINAS POLIÉSTER. FUENTE: GONZÁLEZ (1995) .....	19
TABLA 1.11 GENERALIDADES DE LAS RESINAS DE VINILÉSTER. FUENTE: PROPIA .....	22
TABLA 1.12 PROPIEDADES DE LAS MATRICES. FUENTE: MIRAVETE (2007) .....	24
TABLA 1.13 PROPIEDADES DE LAS MATRICES. FUENTE: MEL COMPOSITES .....	26
TABLA 1.14 PROCESO DE POSTCURADO DE LA RESINA GP33. FUENTE: MEL COMPOSITES .....	27
TABLA 1.15 COSTES DE LAS RESINAS. FUENTE: MEL COMPOSITES .....	27
TABLA 1.16 GENERALIDADES DE LOS AGENTES DE CURADO. FUENTE: PROPIA .....	29
TABLA 1.17 TÉCNICAS DE MODELO POR CONTACTO. FUENTE: BESEDNJAK (2005) .....	34
TABLA 1.18 GENERALIDADES DE LA FIBRA DE VIDRIO. FUENTE: MIRAVETE (2007) .....	37
TABLA 1.19 COMPOSICIÓN DE LA FIBRA DE VIDRIO Y APLICACIONES. FUENTE: WWW.TECNOLOGIADELOSPLASTICOS.COM .....	40
TABLA 1. 20 GENERALIDADES DE LA FIBRA DE CARBONO. FUENTE: BESEDNJAK (2005) .....	43
TABLA 1.21 PROCESADO DE LA FIBRA DE CARBONO. FUENTE: PROPIA .....	44
TABLA 1.22 TIPOS DE FIBRA DE CARBONO. FUENTE: MIRAVETE (2007) .....	45
TABLA 1.23 GENERALIDADES DE LA FIBRA ARAMÍDICA. FUENTE: MIRAVETE (2007) .....	46
TABLA 1.24 TIPOS DE FIBRA ARAMÍDICA. FUENTE: SMITH (2006) .....	47
TABLA 1. 25 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES DE REFUERZO. FUENTE: MIRAVETE (2007) .....	48
TABLA 1.26 COSTES DE LOS MATERIALES DE REFUERZO. FUENTE: MEL COMPOSITES .....	49
TABLA 1.27 CLASIFICACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS TEXTILES. FUENTE: PROPIA .....	50

## CAPÍTULO 2

TABLA 2.1 CICLO DEL MODELADO 3D DE LA EMBARCACIÓN. FUENTE: PROPIA .....	55
TABLA 2.2 DIMENSIONES DE LA EMBARCACIÓN CABALLERO. FUENTE: WWW.SHIPMODELL.COM .....	56
TABLA 2.3 OPCIONES DE PROPULSIÓN DE LA EMBARCACIÓN CABALLERO. FUENTE: WWW.SHIPMODELL.COM .....	56
TABLA 2.4 RECONOCIMIENTOS DE LAS EMBARCACIONES DE RECREO. FUENTE: APUNTES DE LA ASIGNATURA DE INSPECCIÓN DE EMBARCACIONES DE RECREO .....	57
TABLA 2.5 TITULACIONES NÁUTICAS BÁSICAS. FUENTE: APUNTES DE LA ASIGNATURA DE INSPECCIÓN DE EMBARCACIONES DE RECREO .....	58

TABLA 2.6 CATEGORÍAS DE DISEÑO Y ZONAS DE NAVEGACIÓN. FUENTE: APUNTES DE LA ASIGNATURA DE INSPECCIÓN DE EMBARCACIONES DE RECREO .....	59
TABLA 2.7 COMANDOS EMPLEADOS PARA LA PARAMETRIZACIÓN Y COLOCACIÓN DE PLANOS. FUENTE: PROPIA .....	61
TABLA 2.8 COMANDOS EMPLEADOS PARA LA GENERACIÓN DEL CASCO. FUENTE: PROPIA .....	63
TABLA 2.9 COMANDOS EMPLEADOS PARA LA GENERACIÓN DEL ESPEJO DE POPA .....	64
TABLA 2.10 COMANDOS EMPLEADOS PARA LA GENERACIÓN DE LAS SUPERFICIES DEL CASCO. FUENTE: PROPIA .....	66
TABLA 2.11 COMANDOS EMPLEADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA CABINA I. FUENTE: PROPIA .....	68
TABLA 2.12 COMANDOS EMPLEADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA CABINA II. FUENTE: PROPIA .....	72
TABLA 2.13 COMANDOS EMPLEADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL SALPICADERO. FUENTE: PROPIA ...	75
TABLA 2.14 COMANDOS EMPLEADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LOS INDICADORES. FUENTE: PROPIA .....	78
TABLA 2.15 COMANDOS EMPLEADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MANDO A DISTANCIA. FUENTE: PROPIA .....	80
TABLA 2.16 COMANDOS EMPLEADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA RUEDA DE TIMÓN. FUENTE: PROPIA .....	81
TABLA 2.17 COMANDOS EMPLEADOS PARA LA RENDERIZACIÓN DE LA MOTORA. FUENTE: PROPIA .....	82
TABLA 2.18 COMPARATIVA DE LOS PARÁMETROS DE LA MOTORA. FUENTE: PROPIA .....	87

### CAPÍTULO 3

TABLA 3.1 DATOS DE LA MOTORA CABALLERO PARA LA APLICACIÓN DE LA NORMATIVA. FUENTE: WWW.SHIPMODELL.COM .....	90
TABLA 3.2 PARÁMETROS PRINCIPALES DE LA MOTORA CABALLERO. FUENTE: PROPIA .....	92
TABLA 3.3 VALORES DE KDC EN FUNCIÓN DE LA CATEGORÍA DE DISEÑO. FUENTE: ISO 12215-5:2008....	94
TABLA 3.4 FACTOR DE REDUCCIÓN DE PRESIÓN SEGÚN LA SUPERFICIE $K_{AR}$ DEL PANEL A1. FUENTE: PROPIA .....	97
TABLA 3.5 MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS. FUENTE: ISO 12215-5:2008 .....	101
TABLA 3.6 FACTOR DE CORRECCIÓN DE CURVATURA $K_C$ . FUENTE: ISO 12215-5:2008 .....	102
TABLA 3.7 FACTOR DE ALARGAMIENTO POR RESISTENCIA A LA FLEXIÓN $K_2$ . FUENTE: ISO 12215-5:2008 .....	103
TABLA 3.8 OBTENCIÓN DE LA TENSIÓN DE DISEÑO $\Sigma D$ . FUENTE: PROPIA .....	105
TABLA 3.9 ESPESORES MÍNIMOS DE LOS PANELES. FUENTE: PROPIA .....	106
TABLA 3.10 DETERMINACIÓN DEL ESPESOR DEL LAMINADO PROPUESTO. FUENTE: ISO 12215-5:2008	107
TABLA 3.11 SECUENCIA DE LAMINADO PROPUESTA. FUENTE: PROPIA .....	108
TABLA 3.12 VALORES DE RESISTENCIA AL AVANCE Y POTENCIA EFECTIVA DE LA MOTORA CABALLERO. ....	116
TABLA 3.13 COMPROBACIÓN DE POTENCIAS. FUENTE: PROPIA .....	117
TABLA 3.14 TRIMADOS DE LA EMBARCACIÓN. FUENTE: PROPIA .....	119
TABLA 3.15 PARÁMETROS INICIALES PARA EL CÁLCULO DE LA RESISTENCIA AL AVANCE. FUENTE: PROPIA .....	123
TABLA 3.16 PROPIEDADES DEL CASCO. FUENTE: PROPIA .....	124
TABLA 3.17 LOCALIZACIÓN DEL CENTRO DE GRAVEDAD PROVISIONAL. FUENTE: PROPIA .....	124
TABLA 3.18 MÁXIMA POTENCIA SOPORTADA POR LA EMBARCACIÓN. FUENTE: PROPIA .....	128
TABLA 3.19 RENDIMIENTO APROXIMADO DE UN MOTOR FUERABORDA. FUENTE: WWW.TORQEEDO.COM .....	129
TABLA 3.20 DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA NOMINAL DEL MOTOR FUERABORDA. FUENTE: PROPIA .....	129

---

TABLA 3.21 CARACTERÍSTICAS DEL MOTOR E-TEC 60 CV. FUENTE: WWW.EVINRUDE.COM .....	130
TABLA 3.22 DIMENSIONES DE LA EMBARCACIÓN PARA EL ENSAYO DEL MOTOR FUERABORDA. FUENTE: WWW.EVINRUDE.COM .....	131
TABLA 3.23 CONSUMO ESPECÍFICO DEL MOTOR E-TEC 60 CV. FUENTE: PROPIA .....	132
TABLA 3.24 AUTONOMÍA DE LA MOTORA CABALLERO. FUENTE: PROPIA .....	133
TABLA 3. 25 ENSAYOS A APLICAR. FUENTE: ISO 12217-3:2017 .....	136
TABLA 3.26 DETERMINACIÓN DEL FACTOR $F_1$ . FUENTE. PROPIA .....	138
TABLA 3. 27 DETERMINACIÓN DEL FACTOR $F_2$ . FUENTE: PROPIA .....	138
TABLA 3.28 DETERMINACIÓN DEL FACTOR $F_3$ . FUENTE: PROPIA .....	139
TABLA 3.29 DETERMINACIÓN DEL FACTOR $F_4$ . FUENTE: PROPIA .....	140
TABLA 3.30 DETERMINACIÓN DEL FACTOR $F_5$ . FUENTE: PROPIA .....	140
TABLA 3.31 DETERMINACIÓN DE LA CATEGORÍA DE DISEÑO EN FUNCIÓN DE LA ALTURA DE INUNDACIÓN. FUENTE. ISO 12217-3:2017 .....	141
TABLA 3.32 DISTRIBUCIÓN DE PESOS EN CONDICIÓN DE MÁXIMA CARGA. FUENTE: PROPIA .....	144
TABLA 3.33 DETERMINACIÓN DEL CENTRO DE GRAVEDAD. FUENTE: PROPIA .....	144
TABLA 3.34 COMPARACIÓN DE LOS ÁNGULOS DE ESCORA PERMITIDO. FUENTE: PROPIA .....	146
TABLA 3.35 MÁRGENES MÍNIMOS DE FRANCO BORDO. FUENTE: ISO 12217-3:2017 .....	147



## CAPÍTULO 0 INTRODUCCIÓN

En una sociedad cada vez más exigente es primordial que las empresas ofrezcan productos y/o servicios de calidad si desean mostrar un carácter competitivo. Uno de los factores que más relevancia tienen en el resultado final de un producto es la materia prima con la que se trabaja. Extrapolando esta situación al sector naval, concretamente a la náutica de recreo, se puede asegurar que el comportamiento de una embarcación varía en demasía dependiendo del material compuesto del que esté fabricada. Parámetros como el desplazamiento o la respuesta bajo cargas son claros ejemplos. Uno de los principales objetivos del proyecto es indagar sobre cuáles son las fortalezas y debilidades de los diferentes materiales de refuerzo y matrices para posteriormente poder efectuar una comparativa de garantías. Encontrar un compromiso acorde entre las propiedades de los materiales y el coste de los mismos resultará determinante.

Una vez concluido el bloque referente a los materiales compuestos, el trabajo se enfoca en el modelaje de una motora a partir de sus planos de formas. La realización de este apartado viene motivada por la necesidad de familiarizarse con herramientas de diseño fuertemente implantadas en la industria naval, como es el caso del software *Rhinoceros*. El objetivo es facilitar al lector una serie de directrices y comandos esenciales para la generación de formas y por ende sacar el máximo partido a la versatilidad que muestran los materiales compuestos para adaptarse a la superficie de los moldes.

El tercer y último bloque del proyecto aborda el estudio de ciertos parámetros de la motora modelada. La finalidad es cerciorarse de que la embarcación presenta garantías en términos de seguridad y gobernabilidad. La elaboración de este apartado está incentivada por la inexperiencia mostrada para trabajar con normativa ISO. La idea principal es tener una primera toma de contacto con dicha normativa en lugar de trabajar con reglamentos de sociedades de clasificación como ha sido habitual durante el transcurso del grado. Del mismo modo, el trasfondo de este apartado recae en una autoevaluación global dado que se deberán poner en práctica distintos conceptos adquiridos.

### ESTRUCTURACIÓN DEL TRABAJO

Con miras a llevar a cabo el proyecto de manera ordenada se ha realizado un diagrama de Gantt que permita comprobar si se cumplen los períodos de tiempo establecidos inicialmente. Del mismo modo, durante el desarrollo del trabajo se han enmarcado los aspectos más relevantes de cada uno de los apartados realizados.

Actividad	Inicio	Final	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN A LOS MATERIALES COMPUESTOS</b>	12/02/2019	27/03/2019	<b>CAPÍTULO 1</b>								
Búsqueda bibliográfica.	12/02/2019	27/03/2019									
Resumen de información.	19/02/2019	27/03/2019									
Redactado matrices.	19/02/2019	04/03/2019									
Redactado materiales de refuerzo.	05/03/2019	20/03/2019									
Formatos textiles.	21/03/2019	27/03/2019									
<b>CAPÍTULO 2. MODELADO DE LA EMBARCACIÓN.</b>	08/04/2019	01/06/2019			<b>CAPÍTULO 2</b>						
Formación en Rhinoceros.	08/04/2019	01/06/2019									
Elección de la motora.	15/04/2019	18/04/2019									
Modelado del casco.	19/04/2019	23/04/2019									
Modelado panel de control.	24/04/2019	30/04/2019									
Modelado detalles.	01/05/2019	06/05/2019									
Estudio paramétrico del casco obtenido.	09/05/2019	10/05/2019									
Redacción del capítulo.	13/05/2019	30/05/2019									
<b>CAPÍTULO 3. EVALUACIÓN DE LA MOTORA</b>	03/06/2019	16/09/2019					<b>CAPÍTULO 3</b>				
Elección de los parámetros a estudiar.	03/06/2019	05/06/2019									
Escantillonado.	04/06/2019	04/06/2019									
Análisis de la ISO 12215.	05/06/2019	07/06/2019									
Elaboración hoja de cálculo.	10/06/2019	21/06/2019									
Redactado escantillonado.	24/06/2019	28/06/2019									
Resistencia al avance.	29/06/2019	29/06/2019									
Análisis de las resistencias.	01/07/2019	03/07/2019									
Cálculo de la resistencia al avance Maxsurf.	04/07/2019	05/07/2019									
Cálculo de la resistencia al avance hoja de cálculo.	08/07/2019	15/07/2019									
Determinación del sistema de propulsión.	16/07/2019	17/07/2019									
Redactado resistencia al avance.	18/07/2019	29/07/2019									
Disposición general.	29/07/2019	29/07/2019									
Elaboración de planos.	29/07/2019	05/08/2019									
Estudio de la estabilidad.	06/08/2019	06/08/2019									
Análisis ISO 12217.	06/08/2019	09/08/2019									
Distribución de pesos.	23/08/2019	28/08/2019									
Cálculo del centro de gravedad hoja de cálculo.	29/08/2019	30/08/2019									
Ensayo de altura de inundación requerida.	02/09/2019	04/09/2019									
Ensayo compensación de cargas.	06/09/2019	11/09/2019									
Corrección bibliografía.	12/09/2019	16/09/2019									
<b>CONCLUSIONES</b>	19/09/2019	23/09/2019									
<b>CORRECCIÓN TRABAJO</b>	24/09/2019	07/10/2019									



## CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN A LOS MATERIALES COMPUESTOS

Se entiende por material compuesto aquel material que está conformado por la combinación de dos o más materiales con el objetivo de proporcionar al material resultante unas mejores propiedades de las que presentan cada uno de sus componentes por separado. En los materiales compuestos se diferencian dos elementos esenciales, la matriz y el refuerzo, también conocidos como fase continua y discontinua respectivamente. La matriz, entre otras muchas funcionalidades, es la encargada de mantener unido el refuerzo y proporcionarle una película protectora que garantice la integridad del mismo. Por otro lado, el refuerzo destaca por conferir las propiedades mecánicas al material compuesto.

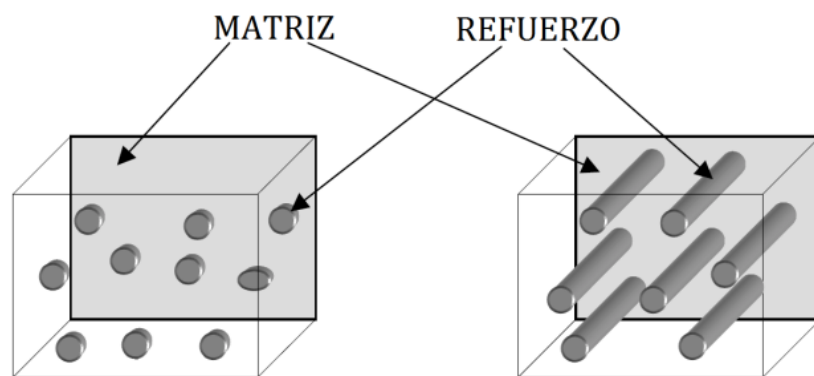


Figura 1.1 Matriz y refuerzo del material compuesto. Fuente: [www.grupocarman.com](http://www.grupocarman.com)

Conjuntamente a la matriz y al material de refuerzo, a los materiales compuestos se les añade una serie de cargas y aditivos que le otorgan unas cualidades específicas. Una vez mencionados los distintos elementos que constituyen los *composites*,<sup>1</sup> indicar que una de las condiciones para que un material pueda ser considerado compuesto es que ninguno de los constituyentes debe ser capaz de disolverse completamente en el otro. En la tabla 1.1 aparecen reflejadas las funciones de los componentes de los *composites*:

---

*Composites*<sup>1</sup>, término anglosajón que hace referencia a los materiales compuestos.

MATERIAL COMPUESTO	
COMPONENTES	GENERALIDADES
<b>Matriz (Fase continua)</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>○ Mantener unido el material de refuerzo.</li><li>○ Transferir las cargas a través del material.</li><li>○ Proteger al material de refuerzo de agentes externos.</li></ul>
<b>Refuerzo (Fase discontinua)</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>○ Otorgar las propiedades mecánicas al material compuesto. Concretamente resistencia y rigidez.</li><li>○ Absorber las cargas de trabajo.</li></ul>
<b>Cargas y aditivos</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>○ Reducir el peso de la pieza y por lo tanto el coste.</li><li>○ Mejorar la manejabilidad de la matriz.</li><li>○ Aumentar las propiedades mecánicas del material.</li><li>○ Proporcionar mejores acabados superficiales.</li></ul>

Tabla 1.1 Constituyentes de los materiales compuestos. Fuente: Propia

Como se observa, todos elementos desarrollan una labor de suma importancia en los materiales compuestos, por lo que se tratarán con mayor profundidad en sus respectivos apartados.

## 1. MATRICES

Dado que el estudio de los materiales compuestos es muy amplio, una manera eficiente de clasificarlos es según el tipo de matriz empleada tal y como se muestra a continuación:

MATRICES		
INORGÁNICAS	Cemento, Geopolímeros, Yeso	
	Matrices cerámicas	
	Matrices metálicas	
ORGÁNICAS	<u>Termoestables</u>	Epoxi, Viniléster, Poliéster, Fenólica, Esteres cianato, Bismaleimidas, Poliimidas, Polieteramida
	<u>Termoplásticos</u>	Policloruro de vinilo (PVC), Polietileno (PE), Polipropileno (PP), Policarbonato (PC), Polioximetileno (POM), Poliestireno (PS), Polieterimida, PET, Nylon, Poliamida

Tabla 1.2 Clasificación de las matrices empleadas en los materiales compuestos. Fuente: Miravete (2007)

En la tabla 1.2 se presentan una gran cantidad de matrices. En el apartado de las inorgánicas hay que resaltar las de índole cerámico y metálico, que destacan por su buena respuesta térmica y mecánica respectivamente. Por otro lado, las matrices orgánicas engloban los materiales comúnmente conocidos como plásticos. Se diferencian dos bloques dependiendo de su comportamiento térmico: los termoplásticos y termoestables. Los primeros se funden cuando se exponen a una fuente de calor. Sin embargo, los termoestables no se funden, se degradan.

*El trabajo se enfoca fundamentalmente en aquellas matrices empleadas en el sector de la náutica de recreo, que son concretamente las resinas epoxi, viniléster y poliéster, las tres de origen polimérico. Esta clase de resinas muestran ciertos aspectos con respecto a las matrices metálicas y cerámicas que las hacen idóneas para el sector naval. Uno de los más relevantes es la densidad, permitiendo la construcción de embarcaciones de menor desplazamiento. Otro punto a tener en cuenta es su facilidad de manejo y procesado. Son matrices que a temperatura ambiente se encuentran en estado líquido, por lo que no requieren de aportación de calor para su posterior uso. Además, impregnan fácilmente el material de refuerzo. Muestran buenas propiedades mecánicas y una alta estabilidad térmica, sin llegar a alcanzar los valores de las matrices metálicas y cerámicas. Finalmente, el factor económico es determinante, son resinas con un bajo precio que permiten realizar laminados de grandes dimensiones.*

### 1.1 MATRICES METÁLICAS

Dentro del campo de los materiales compuestos, probablemente se trate del ámbito al que se haya invertido menor dedicación. Este desconocimiento no es exclusivamente fruto del elevado coste que presentan algunos metales, sino de los distintos procesos a los que se debía someter el material hasta obtener la pieza deseada. Gracias al avance de la ciencia y tecnología se han podido optimizar las técnicas de producción reduciendo así el impacto económico. Este hecho ha permitido que los materiales compuestos con fase continua metálica no se dediquen únicamente a sectores que requieren de unas altas prestaciones, como por ejemplo el aeronáutico, sino que también sean habituales en otras industrias tales como la automoción o la electrónica.

Como suele ser habitual, una de las características prioritarias que se buscan a la hora de diseñar una pieza es que, además de cumplir unos parámetros específicos, ésta sea de un peso reducido. Por lo que los metales más empleados como matriz son el aluminio, el titanio y el magnesio. Otra peculiaridad de esta tipología de materiales es el hecho de poder tener distintas

propiedades en diferentes direcciones si se desea, siendo por lo tanto *anisótropo*<sup>2</sup>. Un claro ejemplo de esta clase de materiales es el *cermet*, que no es más que un material fruto de la combinación de una matriz metálica y un refuerzo cerámico. Como matriz suelen emplear cobalto o níquel, y en el caso del refuerzo se requiere de carburo de titanio o tungsteno. Como resultado se obtiene un material de elevada dureza y tenacidad, propiedades que lo hacen ideal para la fabricación de herramientas de corte. En la figura 1.2 se aprecian herramientas de mecanizado constituidas por *cermet*.

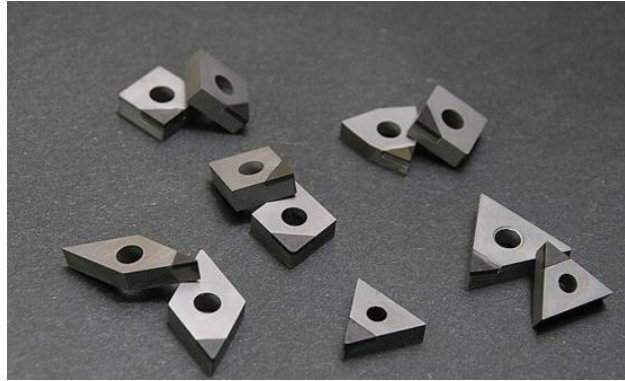


Figura 1.2 Herramientas de mecanizado de *cermet*. Fuente: [www.incametal.com](http://www.incametal.com)

Una forma de clasificar esta tipología de matrices es hacerlo en función del refuerzo empleado: fibras continuas, discontinuas o partículas. En la figura 1.3 se adjunta una descripción gráfica de cada una de ellas.

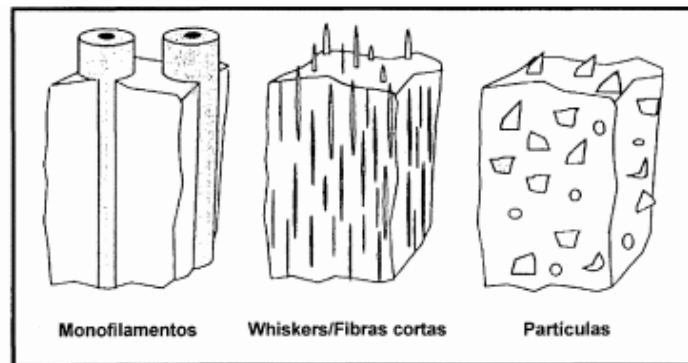


Figura 1.3 Refuerzos empleados para materiales compuestos de matriz metálica. Fuente: Revista de metalurgia (2000)

<sup>2</sup> *Anisótropo*, material cuyas propiedades se ven influenciadas según la dirección de estudio.

A continuación, la tabla 1.3 recoge de forma resumida las principales ventajas de cada tipo de refuerzo:

REFUERZO	CARACTERÍSTICAS
<b>Fibras continuas</b>	Disponen de una baja salida en el mercado dado que presentan desventajas como: ataques químicos por parte de la matriz, desestabilidad térmica y una fácil oxidación de las mismas. Las fibras más recurrentes son la de boro, alúmina y carburo de silicio.
<b>Fibras discontinuas</b>	<p>Son más económicas que las fibras continuas debido a que ofrecen un peor rendimiento mecánico. Surgen de la combinación de óxidos y sus diámetros varían entre 3 y 5 <math>\mu\text{m}</math>.</p> <p>Por otro lado, los <i>whiskers</i><sup>3</sup> también son fibras discontinuas, pero con mejores prestaciones. Pueden llegar a alcanzar 1 <math>\mu\text{m}</math> de diámetro y 100 <math>\mu\text{m}</math> de longitud. Comúnmente son de carburo de silicio y nitrato de silicio.</p>
<b>Partículas</b>	Destacan por dotar al material de una gran isotropía. Para poder emplearlos en el campo de los materiales compuestos es imprescindible controlar el tamaño y pureza de las partículas. Es el refuerzo más económico y entre los materiales más solicitados se encuentran carburos, nitruros, el grafito y la alúmina.

Tabla 1.3 Clasificación de los materiales de refuerzo de matriz metálica. Fuente: Revista de metalurgia (2000)

*Whiskers*<sup>3</sup>, son pequeñas fibras monocristal con una elevada pureza y una estructura cristalina bien definida que otorgan una gran resistencia y rigidez a pesar de sus diminutas dimensiones (Centro Español de Plásticos).

*Como conclusión, esta clase de matrices son la alternativa a las de origen polimérico cuando se pretende alcanzar alguna de las siguientes características:*

- *Mejores propiedades mecánicas en la orientación transversal.*
- *Elevada conductividad térmica y eléctrica.*
- *Mayor resistencia al desgaste.*
- *Nula absorción de humedad.*

El excelente comportamiento eléctrico de las matrices metálicas provoca que sean materiales demandados en el sector. Algunas de estas aplicaciones son:

APLICACIÓN EN EL SECTOR ELÉCTRICO	MATRIZ/REFUERZO
Contactos para baja tensión	Cu-Ni/Gr <sup>A</sup> , Cu/Gr, Ag/Gr, Ag-Cu/Gr
Seccionadores de distribución de energía	Cu/(SiC+Gr)
Escobillas para motores	Cu/Gr

*Tabla 1.4 Aplicaciones de las matrices metálicas. Fuente: Aplicaciones de los materiales compuestos de matriz metálica en el sector eléctrico y electrónico (2005)*

## 1.2 MATRICES CERÁMICAS

En líneas generales, los materiales cerámicos destacan por su baja conductividad térmica y eléctrica, una alta dureza y en contrapartida por su fragilidad. Con la agregación de material de refuerzo a las matrices cerámicas se han conseguido importantes avances en relación a sus propiedades.

Actualmente, el estudio de materiales compuestos de matrices cerámicas se centra en dos ramas distintas. La primera tiene como objetivo mejorar únicamente la dureza del material conservando las propiedades originales de la matriz cerámica mediante la adición de una pequeña cantidad de fibra. Por otro lado, la segunda trabaja con un mayor volumen de material de refuerzo con el propósito de aportar las mejores propiedades (fundamentalmente rigidez,

---

Gr<sup>A</sup>, abreviatura de grafito.

resistencia y tenacidad) al *composite* resultante. Paralelamente, la matriz es la encargada de asegurar que el material compuesto sea capaz de conservar dichas propiedades cuando se encuentra en entornos con una temperatura elevada. Un claro ejemplo de material compuesto de matriz cerámica es el hormigón armado, en el cual las barras de acero mejoran las propiedades mecánicas del material. Además, los materiales de matriz cerámica soportan extraordinariamente los choques térmicos, lo que provoca que el hormigón armado sea ideal para la construcción de obras civiles.



Figura 1.4 Hormigón armado. Fuente: [www.ingenierosdecaminos.com](http://www.ingenierosdecaminos.com)

Dejando de lado los dos escenarios actuales de estudio, una forma eficiente de clasificar los materiales compuestos de matrices cerámicas es en función del material de refuerzo empleado tal y como se especifica en la tabla 1.5, en este caso son:

REFUERZO	CARACTERÍSTICAS
<b>Fibras metálicas</b>	Es complicado encontrar fibras metálicas que muestren una compatibilidad adecuada con las matrices cerámicas. El condicionante de haber de someter a los <i>composites</i> de cerámica reforzada a altas temperaturas obliga a que los metales de refuerzo también lo sean, siendo así los metales <i>refractarios</i> <sup>5</sup> los candidatos ideales. Por contrapartida, se oxidan y aumentan considerablemente el peso final del material.

<sup>5</sup> Metales refractarios<sup>5</sup>, conjunto de metales cuya resistencia mecánica no se ve afectada a temperaturas elevadas. Conforman este grupo el tungsteno, wolframio, molibdeno, niobio y tántalo.



<b>Fibras de carbono</b>	La principal característica es su baja densidad en comparación con los metales. Además, tiene una alta resistencia, es rígida y es abundante en el mercado en una amplia gama de longitudes. En el caso de las matrices cerámicas, suelen tener diámetros de 8 $\mu\text{m}$ y tienen un coeficiente de expansión térmica pequeño.
<b>Fibras cerámicas</b>	Debido a que las fibras de origen cerámico no se oxidan fácilmente, se han podido obtener materiales compuestos de matriz cerámica que tengan un buen comportamiento en ambientes con elevada temperatura y presencia de oxígeno. Las fibras cerámicas habitualmente empleadas son: las fibras de carburo de silicio y las de carburo de alúmina.

Tabla 1.5 Clasificación de los materiales compuestos de matriz metálica según el material de refuerzo. Fuente: Miravete (2007)

*De la tabla 1.5 se puede extraer que las matrices cerámicas son las más idóneas cuando se requiera conservar las propiedades del material a elevadas temperaturas. Por otro lado, el refuerzo tiene como objetivo incrementar la tenacidad y resistencia del material. Es esencial realizar una buena elección del material de refuerzo, ya que dependiendo de las condiciones de empleo se optará por uno u otro. Si la temperatura es un factor determinante, claramente se debe hacer uso de las fibras metálicas o cerámicas, éstas últimas son las que conservan mejor las propiedades en ambientes extremos. Por otro lado, la fibra de carbono otorga excelentes propiedades mecánicas y una densidad reducida. En contraposición, tienen un precio elevado y no son capaces de soportar temperaturas tan elevadas como las cerámicas.*

### 1.3 MATRICES ORGÁNICAS TERMOESTABLES

La tabla 1.2 refleja una amplia gama de matrices de origen polimérico. Pero antes de profundizar en alguna de ellas, cabe la necesidad de diferenciar ambos bloques y resaltar algunas de sus características más relevantes. Seguidamente, en la tabla 1.6 se exponen los puntos más importantes de ambos grupos:

PROPIEDADES	TERMOPLÁSTICOS	TERMOESTABLES
<b>Enlace</b>	Polímeros con una fuerza de enlace relativamente débil en comparación con los termoestables debido a que se funden cuando se les aplica calor.	Formados por polímeros unidos mediante enlaces covalentes altamente intensos, los cuales se romperán antes de permitir la separación de las cadenas de polímeros. Poseen una estructura tridimensional compleja compuesta por muchos entrecruzamientos.
<b>Formato</b>	Se presentan en estado sólido (generalmente) a temperatura ambiente y requieren de aportación de calor para alcanzar el estado líquido que permita su empleo.	Esta clase de resina es la más comercializada. A temperatura ambiente se encuentra en estado líquido. Para solidificarse debe someterse al proceso de curado.
<b>Comportamiento térmico</b>	La aportación de calor genera que el material se funda y vuelva a alcanzar el estado líquido. Esta clase de matrices se pueden fundir y solidificar varias veces sin disminuir sus propiedades.	En este caso, una vez la resina ya se ha solidificado, si se aproxima el material a una fuente de calor éste no se funde, sino que se degrada. Al mismo tiempo poseen una elevada <i>temperatura de transición vítrea</i> <sup>6</sup> $T_g$ .

Tabla 1.6 Matrices orgánicas. Fuente: Propia

<sup>6</sup> *Transición vítrea*  $T_g$ , se trata de un fenómeno común en vidrios y polímeros. Es la temperatura que provoca que el material pierda rigidez y tolere cierta maleabilidad. Es importante no confundirlo con el estado de fusión de un material.

*Sin lugar a dudas, las matrices termoestables son las más empleadas en el sector de la náutica de recreo. Los aspectos que potencian su comercialización son su elevada resistencia a la corrosión, alta rigidez y baja densidad. En contraposición, la necesidad de un proceso de curado dificulta manejabilidad de este tipo de productos, requiriendo de un personal cualificado dependiendo del método de laminación que se vaya a emplear. Actualmente, uno de los puntos más importantes de las matrices termoestables es que no se pueden reciclar, dado que al calentarse se degradan en lugar de fundirse como los termoplásticos. Esto implica que tampoco se pueda reciclar al material de refuerzo acompañante, como por ejemplo la fibra de vidrio. De esta forma se produce un gran impacto medioambiental, debido a que el uso de estas matrices se ha ido extendiendo a distintos sectores industriales.*

Bajo el concepto de matriz termoestable se engloban distintas clases de fases continuas. La elección de una u otra viene dictaminada por la temperatura de empleo tal y como se muestra en la figura 1.5. La industria naval hace uso de matrices de bajas y medias temperaturas, por lo que el trabajo desarrolla los conceptos de las matrices poliéster, viniléster y epoxi.

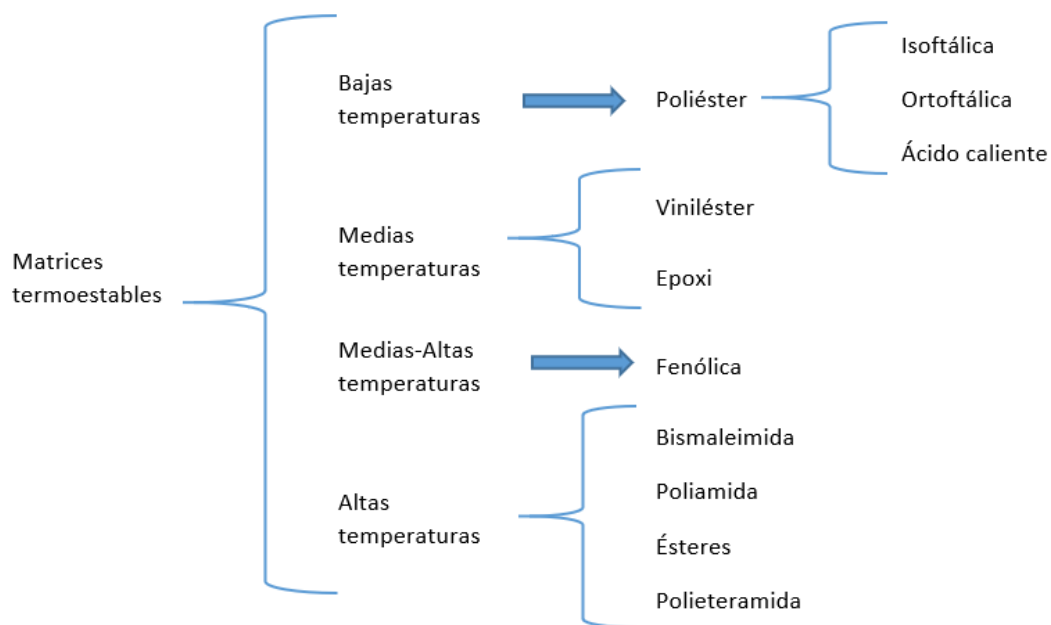


Figura 1.5 Clasificación de las matrices termoestables en función de su temperatura de empleo Fuente: Miravete (2007)

### 1.3.1 RESINAS EPOXI

Actualmente, el uso de resina epoxi abarca una gran cantidad de campos. Desde recubrimientos para pinturas de automóviles hasta su empleo como aislante eléctrico. En el caso de la industria naval, a causa de su elevado coste se reserva para embarcaciones y/o piezas que soliciten un alto rendimiento. De forma general se puede concluir que es la clase de matriz que posee mejores propiedades mecánicas y la que tiene un coste más elevado. En la tabla 1.7 se resumen los aspectos más importantes de este tipo de resina:

RESINAS EPOXI	
<b>Composición</b>	Se caracterizan por albergar dos o más grupos epóxidos. Generalmente, estas resinas requieren del uso de agentes de curado que permitan alcanzar el estado sólido.
<b>Postcurado</b>	Los agentes de curado empleados con más asiduidad son las aminas primarias o secundarias, poliamidas y anhídridos orgánicos. Estos componentes además de actuar como catalizadores también condicionan las propiedades finales de la resina.  Dejando de lado los agentes de curado, la peculiaridad más importante de las resinas epoxi recae en que necesitan aportación de calor para alcanzar un estado totalmente sólido.
<b>Propiedades mecánicas</b>	Poseen mejores propiedades mecánicas que las resinas poliéster y viniléster. Son ideales cuando el material debe soportar tensiones elevadas. Las características más relevantes son: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Estabilidad dimensional.</li> <li>○ Baja contracción.</li> <li>○ Resistencia química.</li> <li>○ Resistencia dieléctrica.</li> <li>○ Baja absorción de humedad.</li> </ul>
<b>Manejabilidad</b>	La aplicación es más compleja que las demás debido a su elevada viscosidad. Es necesario personal experimentado que garantice la

	impregnación del refuerzo antes de que la resina alcance el punto de gel.
--	---

Tabla 1.7 Generalidades de las resinas epoxi. Fuente: Propia

*Además de las excelentes propiedades mecánicas, esta clase de resinas son de especial interés en la náutica de recreo por dos razones primordiales. El primer motivo es su baja capacidad higroscópica que permite prolongar la vida útil de la embarcación. La segunda causa es el fuerte poder de adhesión que muestran las matrices epoxi, esto posibilita llevar a cabo laminados con una menor cantidad de resina y por ende la construcción de embarcaciones con mejores propiedades mecánicas y menor desplazamiento. En contrapartida, el factor económico es determinante y el elevado coste de la resina además de la necesidad de la aplicación de un proceso de postcurado provocan que el comprador valore opciones más económicas. Por lo tanto, se concluye que el uso de las resinas epoxi se reserva cuando se deba diseñar una embarcación de altas prestaciones y bajo peso.*

Otra de las principales funciones de las resinas epoxi en el sector naval es la de mejorar la fijación de la maquinaria a bordo de los buques. Con el empleo de estas matrices se consigue asegurar la alineación de los distintos componentes y se reducen las vibraciones. El concepto es sencillo, consiste en la realización de un encofrado para posteriormente rellenarlo con resina epoxi tal y como se observa en la figura 1.6, donde se observa la unión entre los polines y la bancada del motor.

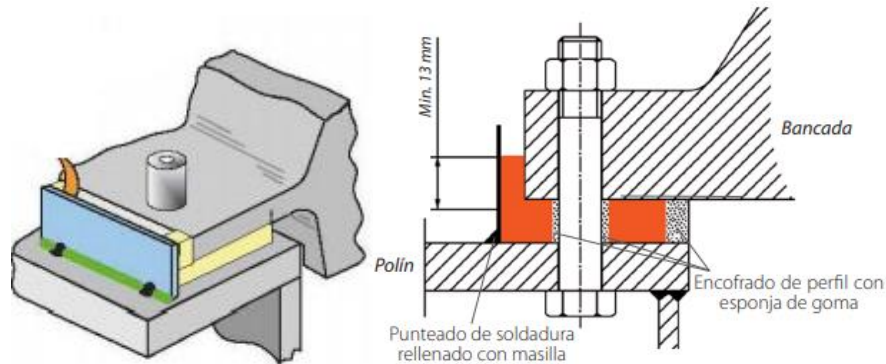


Figura 1.6 Unión entre polines y bancada. Fuente: [www.sintemar.com](http://www.sintemar.com)

La resina epoxi no solo se emplea para mejorar la fijación del motor, sino que su uso también se destina para todo tipo de maquinaria que esté expuesta a movimientos rotativos o generen vibraciones. En la figura 1.7 y la tabla 1.8 se aprecian los elementos a los que se les puede aplicar este método y las ventajas que proporciona.

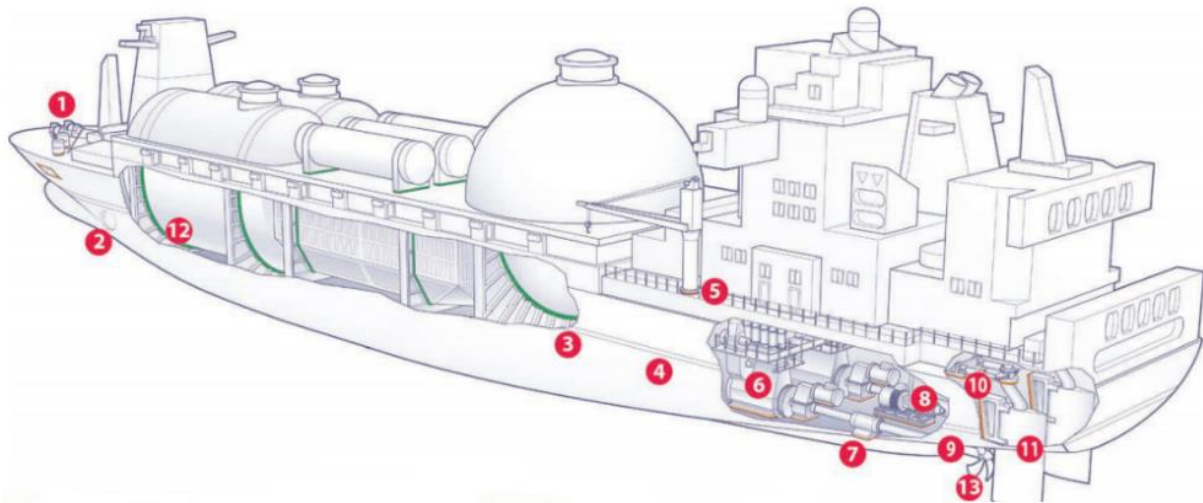


Figura 1.7 Aplicación de resina epoxi. Fuente: [www.sintemar.com](http://www.sintemar.com)

NÚMERO	ELEMENTO	VENTAJAS
1	Molinetes	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Mantiene la alineación de los elementos.</li> <li>○ Reduce el nivel de vibraciones generadas.</li> <li>○ Debido a su estado líquido se adapta perfectamente a las paredes de los elementos, ahorrando así posibles costes de mecanizado.</li> <li>○ Resistente al ataque de sustancias como el fuel o lubricantes.</li> <li>○ No requiere de mantenimiento.</li> </ul>
2	Hélice transversal	
3	Bombas de carga	
4	Motores auxiliares	
5	Rodamientos	
6	Motores principales	
7	Chumaceras	
8	Bombas cámara de máquinas	
9	Bocinas y arbotantes	
10	Servomotor	
11	Limeras y pinzotes	
12	Fijación de tanques	
13	Recubrimientos de eje propulsor	

Tabla 1.8 Ventajas de la resina epoxi empleada para la fijación de maquinaria. Fuente: [www.sintemar.com](http://www.sintemar.com)

### 1.3.2 RESINAS POLIÉSTER

Es la resina predominante en el campo de los materiales compuestos. Se estima que cubre alrededor del 90% de la demanda del mercado. Esto es posible gracias a su gran versatilidad y a su relación calidad/precio. No obstante, se trata de una resina con peores propiedades físicas y químicas que las epoxi y las viniléster. En la tabla 1.9 se recogen los aspectos determinantes de las resinas poliéster:

RESINAS POLIÉSTER	
<b>Composición</b>	<p>Toda resina poliéster contiene los siguientes compuestos químicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Ácido dibásico insaturado, anhídrido maleico.</li> <li>○ Ácido básico saturado, ácido ortoftálico.</li> <li>○ Un alcohol, propilenglicol o etilenglicol.</li> <li>○ Un monómero reactivo, estireno.</li> <li>○ Inhibidor, hidroquinona.</li> </ul> <p>Una vez escogidos los componentes y calculados las cantidades, se procede a calentar una mezcla compuesta por el ácido saturado, el ácido insaturado y el alcohol. El aporte de calor cesa cuando el poliéster ha alcanzado el <i>grado de polimerización</i><sup>7</sup> deseado. Llegado a este punto, el poliéster posee un elevado peso molecular y si se dejara enfriar se solidificaría e impediría la impregnación de los laminados. Para contrarrestar este efecto, se le añade cierta cantidad de monómero reactivo, normalmente estireno que provoca que la mezcla de poliéster pase a un estado líquido de elevada densidad. Finalmente, la adición del inhibidor impide la gelificación y curado de la resina durante su almacenamiento.</p>
<b>Postcurado</b>	<p>Las resinas poliéster generalmente no requieren de un proceso de postcurado. Curan a temperatura ambiente siempre que sea superior a los 15°C.</p>
<b>Propiedades mecánicas</b>	<p>Son las que tienen un peor comportamiento mecánico. Todas las resinas poliéster muestran las siguientes características independientemente a la subclase a la que pertenezcan:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Alta contracción.</li> <li>○ Poca rigidez.</li> <li>○ Baja resistencia a la tracción.</li> </ul>

<sup>7</sup>Grado de polimerización<sup>7</sup>, es el número de ocasiones en que se repite el monómero dentro la cadena polimérica. Es el resultado del cociente entre el peso de la cadena polimérica y el peso molecular del monómero.



<b>Manejabilidad</b>	La viscosidad es inferior en comparación con las resinas epoxi y está comprendida entre 1 y 10000 $cP^8$ por lo que su aplicación es mucho más sencilla. Los picos de temperatura y tiempos de curado también se encuentran por debajo de los valores que muestran las resinas epoxi. Por otro lado, son bastantes similares a los de las matrices viniléser.
----------------------	---

Tabla 1.9 Generalidades de las resinas poliéster. Fuente: Propia

Dado de que se trata de un proceso en el que el origen y proporción de los constituyentes influyen notablemente las características de la matriz, es de esperar que existan distintos grupos de resinas poliéster. Los principales grupos de resinas poliéster son los que se muestran en la siguiente tabla:

TIPO DE RESINA POLIÉSTER	CARACTERÍSTICAS
<b>Ortoftálicas</b>	Es una resina de uso común. Proporcionan tiempos de gel superiores que las isoftálicas. Sin embargo, absorben una elevada cantidad de humedad y muestran una mala respuesta bajo la acción de agentes químicos.
<b>Isoftálicas</b>	Se caracterizan por tener una mayor viscosidad que las ortoftálicas. Están dotadas de mejores propiedades mecánicas y químicas que las ortoftálicas. Además, absorben poca cantidad de agua y mantienen mejor sus propiedades cuando se someten a altas temperaturas.
<b>Isoftálica NPG</b>	Tiene buenas propiedades mecánicas y menor peso que la isoftálica común. Además, es muy resistente a la corrosión hecho que la hace idónea para ambientes marinos. Presenta una baja conductividad térmica y eléctrica.
<b>Bisfenólica</b>	Posee las mejores propiedades. Lógicamente, es la que implica una mayor inversión económica.

Tabla 1.10 Propiedades de las resinas poliéster. Fuente: González (1995)

$cP^8$ , unidad referente a la viscosidad dinámica de los fluidos. Equivale a  $10^{-3} Pa \cdot s$ .

Para minimizar la pérdida de estas propiedades es imprescindible almacenarlas correctamente. Se estima que las matrices poliéster se pueden dejar en desuso un tiempo máximo de seis meses, a partir de ese momento el inhibidor deja actuar y la resina puede llegar a gelificarse. Durante este período, las resinas se deben almacenar en recipientes herméticos, exentos de luz solar y en condiciones de temperatura inferiores a 25°C. Aún y cumpliendo estas normas, es necesario realizar chequeos periódicos que garanticen unas buenas propiedades de la matriz en el momento de su uso. Es habitual que el distribuidor de la resina proporcione una ficha técnica que especifique la frecuencia de los controles y los parámetros que se deben evaluar. Los más comunes son la viscosidad, color de la resina, grado de acidez o basicidad, densidad y porcentaje de monómero.

*En cuanto a las aplicaciones de las resinas poliéster, la más empleada para la laminación de embarcaciones es la ortoftálica. Por otro lado, las isoftálicas se usan en menor medida y generalmente como recubrimiento, dando lugar al concepto del gelcoat. Este recubrimiento se aplica sobre el molde con el objetivo de generar una primera capa protectora contra los posibles ataques químicos que pueda sufrir el laminado. Al mismo tiempo, el gelcoat también juega un papel estético ya que determina el color y brillo de la pieza. En la figura 1.8 se observa la aplicación del gelcoat sobre el molde, el cual debe ser de un color que permita contrastar en que zonas no se ha aplicado el recubrimiento necesario.*



Figura 1.8 Aplicación del gelcoat blanco sobre el molde. Fuente: Drassanes Dalmau

### 1.3.3 RESINAS VINILÉSTER

Una forma habitual de describir las resinas viniléster es contextualizarla a través de las matrices poliéster y las epoxi. Esto es así dado que las resinas viniléster evidencian unas propiedades físicas semejantes a las de las epoxi acompañadas de un proceso curado análogo al de las poliéster. En la tabla 1.11 se detallan los principales parámetros de esta clase de matrices:

RESINAS VINILÉSTER	
<b>Composición</b>	Se obtienen a partir de una <i>poliadición</i> <sup>9</sup> de resina epoxi sobre un ácido insaturado, normalmente ácido acrílico o metacrílico, que posteriormente, al igual que en las resinas poliéster, se le añade estireno que reduce la viscosidad de la resina y mejora la impregnación del material de refuerzo.
<b>Postcurado</b>	No necesitan aportación de calor para su curado completo. Posibilita la obtención de una pieza de alta calidad sin la necesidad de disponer de una infraestructura tan compleja como en el caso de las matrices epoxi.

*Poliadición<sup>9</sup>, es una reacción de polimerización en la que los monómeros constituyen el polímero sin producirse pérdidas de átomos. En este tipo de reacción no se generan productos volátiles, como por ejemplo agua.*

<b>Propiedades mecánicas</b>	<p>Las matrices de viniléster poseen unas propiedades mecánicas un tanto inferiores a las resinas epoxi. Sin embargo, son notablemente superiores a las de poliéster. Las más significativas son:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Contrarresta eficazmente todo tipo de ataques químicos.</li> <li>○ Su buen comportamiento bajo cargas cíclicas y su resiliencia, siendo necesaria una cantidad de energía considerable para que la matriz se comporte plásticamente.</li> <li>○ Resistencia al fuego, hasta tal punto que pueden llegar a ser autoextinguibles si se modifica la molécula de viniléster por mediación de átomos de cloro o bromo.</li> </ul>
<b>Manejabilidad</b>	<p>Su viscosidad es inferior a las de las resinas epoxi, por lo que se facilita la impregnación del laminado. De este modo, el operario dispone de un mayor margen de tiempo en caso de que se produzca algún error. Además, tienen una baja contracción y una mejor adhesión que las poliéster.</p>

*Tabla 1.11 Generalidades de las resinas de viniléster. Fuente: Propia*

Tal y como se hace referencia en la tabla anterior, esta clase de resina destaca principalmente por una característica, su gran resistencia frente ataques químicos. Dicha propiedad es consecuencia directa de la unión entre los grupos éster y el resto de la cadena del monómero, ya que normalmente es en este punto donde se produce la rotura química que da pie al deterioro del material. En el caso de las resinas poliéster, los grupos éster se localizan en el centro de la cadena, por lo que una vez la matriz es atacada químicamente se divide posibilitando la aparición de nuevos ataques. Sin embargo, en las resinas viniléster los grupos éster están situados en los extremos de la cadena, protegiendo así la parte central y dificultando su separación.



Figura 1.9 Bidón de resina viniléster. Fuente: Drassanes Dalmau

*En consecuencia a su elevada resistencia química, el uso de resina viniléster en el sector de la náutica de recreo se emplea básicamente en los laminados exteriores de los cascos de las embarcaciones. El objetivo es crear una capa de elevada resistencia química que dificulte la penetración de agua salada y por ende la aparición de ósmosis en el casco de la embarcación. El motivo por el cual no se lamina la totalidad del casco mediante el uso de resina de viniléster es totalmente económico, ya que su coste es superior al de las matrices de poliéster.*

#### 1.4 COMPARATIVA DE MATRICES TERMOESTABLES

El último apartado focalizado en el estudio de matrices tiene como finalidad comparar distintos aspectos que pueden determinar que el usuario se decante por la elección de un tipo de resina u otra. La comparación se basa en tres factores distintos: propiedades mecánicas, manejo de la resina y coste de la misma. A continuación, se adjuntan una serie de gráficos y tablas que facilitan una rápida y fácil comprensión.

**1) Propiedades mecánicas.**

RESINA	RIGIDEZ (MPa)	TENSIÓN TRACCIÓN (MPa)	% ELONGACIÓN
Poliéster Ortoftálica	3200	65 – 75	2 – 4
Poliéster Isoftálica	3500	70 – 85	3,5
Poliéster Isoftálica NPG	3400	60	2,5
Poliéster Bisfenol A	3200	60 – 75	2,5 – 4
Viniléster	3300 – 3500	81	3,5 – 7
Epoxi (TGMDA)	3800 - 4500	90 - 130	2 – 1

*Tabla 1.12 Propiedades de las matrices. Fuente: Miravete (2007)*

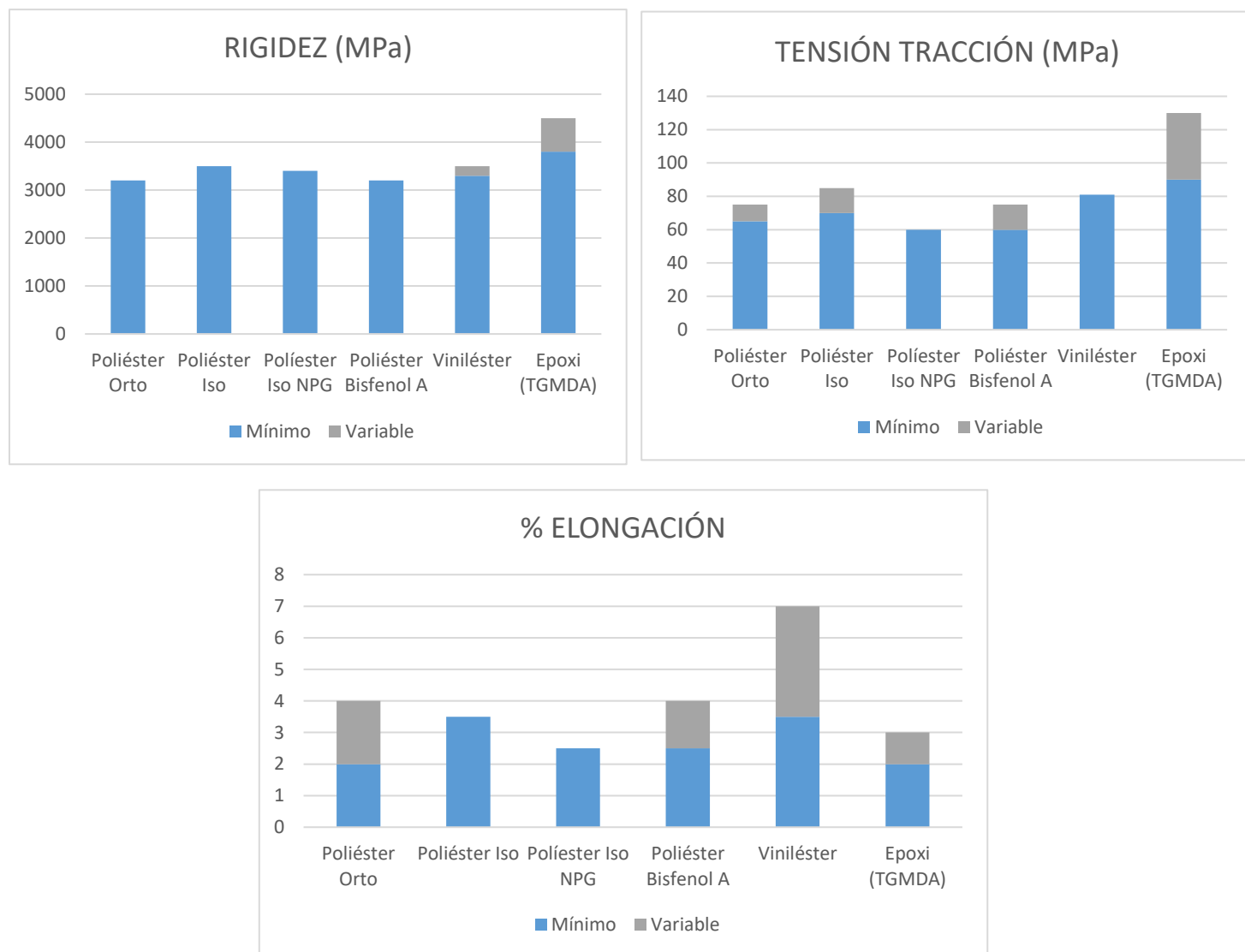


Figura 1.10 Gráficos propiedades mecánicas. Fuente: Propia

En los gráficos se aprecian tres grupos distintos de resina. En ellos se observa que todas las resinas poliéster muestran una rigidez similar independientemente de la categoría a la que pertenezcan. Al mismo tiempo, la rigidez de las resinas viniléster es ligeramente superior a la de las matrices poliéster. Por otro lado, el módulo de Young de las resinas epoxi desbanca claramente a las dos anteriores.

Otra propiedad que argumenta la superioridad de las epoxi es que presentan una mejor respuesta bajo esfuerzos de tracción. Su valor de rotura mínimo siempre es cercano a los 90 MPa, claramente superior al de las demás matrices termoestables.

Para finalizar la valoración mecánica, también se hace referencia a la elongación de la matriz cuando ésta alcanza la tensión límite. En este caso, las epoxi son las que ofrecen peores

resultados probablemente a causa de su elevada rigidez. Este factor dificulta la detección de una posible falla del material. Referente a este aspecto, son las resinas viniléster las que ocupan la primera posición.

## 2) Manejabilidad de la resina.

Para cuantificar de forma más precisa la manejabilidad de las resinas la empresa *Mel Composites* especializada en materiales compuestos ha facilitado la ficha técnica de algunos de sus productos. Se han tenido en cuenta las características siguientes:

PRODUCTO	HA184TPR	HN380TA20	HN800TA31	SR1280/GP33/SD4775
Tipo de resina	Poliéster Orto	Poliéster Iso	Viniléster	Epoxi
Viscosidad (cps)	600-750	600-700	450-550	1300
Tiempo de gel a 25°C (min)	17-25	18-22	27-35	No determinado
Tiempo de curado (min)	34-40	26-34	37-50	50
Pico exotérmico (°C)	175-195	195-215	155-175	255
Postcurado	No	No	No	Sí

Tabla 1.13 Propiedades de las matrices. Fuente: Mel Composites

*De la tabla 1.13 se extrae que el manejo de las resinas epoxi es más complicado que las demás. Su elevada viscosidad (que casi puede llegar a triplicar el de las viniléster) dificulta la impregnación y obliga a que el operario tenga muy presente el tiempo de gel estipulado por el fabricante. En este aspecto, las resinas viniléster son las más sencillas de aplicar ya que disponen de una buena fluidez y un mayor tiempo de gel.*



*Otro punto sumamente importante es la necesidad de un proceso de postcurado. Únicamente es necesario para las matrices epoxi, y éste depende de la temperatura a la que se vaya a exponer y el endurecedor empleado, en esta ocasión el SD4775.*

GP33/SD4775		
Tiempo a 40°C (h)	Tiempo a 60°C (h)	Tiempo a 80°C (h)
24	8	4

Tabla 1.14 Proceso de postcurado de la resina GP33. Fuente: Mel Composites

### 3) Aspecto económico.

Para finalizar se trata el factor económico. Como es habitual, el precio de la resina varía en función de la cantidad demandada. En la tabla 1.15 se muestran los precios cada clase de matriz:

PRODUCTO	NATURALEZA DE LA RESINA	PRECIO €/kg			
		Bidón 1 kg	Bidón 1,22 kg	Bidón 3,70 kg	Bidón 5 kg
HA184TPR	Poliéster Orto	8,18	-	-	6,54
HN380TA20	Poliéster Iso	9,12	-	-	7,30
HN800TA31	Viniléster	11,52	-	-	9,22
GP33/SD4775	Epoxi	-	19,12	14,21	-

Tabla 1.15 Costes de las resinas. Fuente: Mel Composites

Como se puede observar, la diferencia entre las resinas poliéster y viniléster no es tan exagerada. Sin embargo, el precio de la resina epoxi sufre un aumento exponencial.

*Con el estudio de estos tres parámetros, se concluye que la resina epoxi es la que da mejores resultados mecánicos. Como cabe esperar, su precio es el*

*más elevado. A ello hay que sumarle el coste que implica el proceso de postcurado y la infraestructura necesaria para llevarlo a cabo. Por dichos motivos su uso se reserva cuando se trabaje con fibra de carbono como material de refuerzo. La combinación de ambos materiales junto a técnicas de laminado avanzadas proporcionan piezas de excelentes propiedades. Es por esta razón que en la náutica de recreo su empleo se enfoca en la construcción embarcaciones de competición, las cuales deben ser robustas y tener un desplazamiento pequeño.*

### 1.5 AGENTES DE CURADO

Las resinas termoestables son comercializadas en un estado líquido que posteriormente, durante el laminado de la pieza, se solidifica y junto con el material de refuerzo proporcionan las propiedades necesarias al *composite*. Este proceso por el cual la resina se transforma de un estado líquido a sólido es lo que se conoce como proceso de curado. Para llevar a cabo esta transformación no es suficiente disponer de la resina, sino que se requiere del empleo de ciertos elementos que garanticen el proceso de curado, estos son: catalizador, acelerador e inhibidor.

En la tabla 1.16 se exponen de forma resumida las funciones, naturaleza y cantidades necesarias de cada uno de estos elementos para poder llevar a cabo el curado de las resinas.

AGENTES DE CURADO			
ASPECTOS	CATALIZADOR	ACELERADOR	INHIBIDOR
<b>Naturaleza</b>	<p>Peróxidos orgánicos tales como:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Peróxido de benzoilo</li> <li>○ Peróxido de metiletilcetona (MEKP)</li> </ul>	<p>Dos grupos diferenciados en función de su composición:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Sales metálicas</li> <li>○ Aminas terciarias</li> </ul>	<p>Los más empleados son:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Hidroquinona</li> <li>○ Benzoquinona</li> <li>○ Dibutilparacresol</li> </ul>
<b>Funciones</b>	<p>Se agregan justo antes de iniciar el laminado de la pieza. Generan radicales libres que inicien el proceso de polimerización para el curado de la matriz.</p>	<p>Acortan el tiempo de curado de las resinas. Además, son esenciales para que la polimerización se pueda realizar a temperaturas más bajas.</p>	<p>Su objetivo es impedir que la resina alcance el estado de gel durante su almacenamiento. También ayudan a la reducción del pico exotérmico durante el curado y aumentan el tiempo de gel.</p>
<b>Porcentaje másico respecto a la resina (%)</b>	1 – 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Resinas no preaceleradas: 0,1 – 0,5</li> <li>○ Resinas preaceleradas: 0,1 – 0,3</li> </ul>	0,05 – 0,1

Tabla 1.16 Generalidades de los agentes de curado. Fuente: Propia

Una consideración a tener siempre muy presente es que bajo ningún concepto se debe mezclar directamente el catalizador y el acelerador, dado que esto provoca una fuerte reacción exotérmica en forma de explosión. Con el fin de evitar esta situación, la mayoría de proveedores optan por comercializar sus resinas en un estado de preaceleración, ya que las cantidades necesarias son realmente ínfimas.



Figura 1. 11 Agente de curado. Fuente: Drassanes Dalmau

*Otro aspecto importante, es que no todos los catalizadores y aceleradores son compatibles, sino que normalmente la resina preacelerada es la que dictamina la naturaleza del catalizador. Para finalizar, es recomendable respetar las cantidades de los productos pautadas por el fabricante. Omitir estas indicaciones puede dar lugar a mayores temperaturas y acortamientos del tiempo de gel derivando en posibles daños en el molde y la pieza resultante.*

## 1.6 EL PROCESO DE CURADO

Para que la resina pueda proporcionar unas propiedades óptimas al material compuesto debe pasar de un estado líquido a una fase sólida. Esta solidificación de la matriz es lo que se conoce como ciclo de curado y es posible gracias a los agentes químicos detallados en los apartados predecesores: el catalizador, acelerador e inhibidor. Con la intención de facilitar la comprensión de este ciclo, es interesante la aclaración de algunos conceptos previos. Éstos son: punto de gel, pico de temperatura y tiempo de curado.

- Punto de gel, alcanzado este estado se da por finalizado el tiempo de gel. A partir de este instante la resina posee una viscosidad elevada que dificulta la labor de

impregnación de las fibras. Además, la temperatura de la matriz empieza a aumentar rápidamente.

- Pico de temperatura, hace referencia a la temperatura máxima alcanzada durante el curado de la resina. Pasado este instante se considera que la resina es totalmente sólida.
- Tiempo de curado, es el intervalo de tiempo abarcado entre la agregación del catalizador y el momento en el que se produce el pico exotérmico.

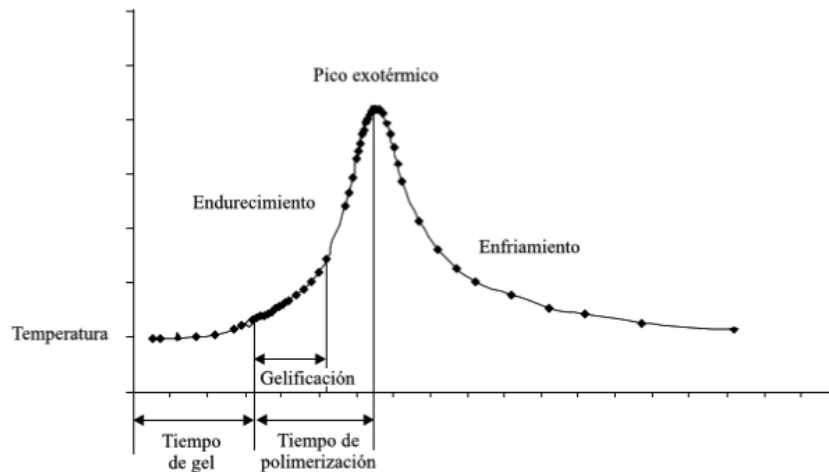


Figura 1.12 Ciclo de curado de una resina. Fuente: Miravete (2007)

Finalizada esta breve explicación, y con la ayuda de la figura 1.12, ya se puede dar paso a la explicación de la evolución del proceso. El tiempo de curado se inicia en el momento que se procede a agregar la cantidad necesaria de catalizador a la resina. Previamente a mezclar la resina preacelerada y el catalizador se debe consultar la ficha técnica de la matriz para saber de cuanto tiempo de gel se dispone en función de los porcentajes empleados, la temperatura ambiente y la humedad relativa.

Una vez realizada la mezcla adecuadamente, se procede a la impregnación del material de refuerzo. La viscosidad inicial de la resina permite una buena manejabilidad de la misma, permitiendo así alcanzar toda la superficie del refuerzo. Por otra parte, estas condiciones no se mantienen constantes a lo largo del proceso, sino que la viscosidad de la resina aumenta progresivamente hasta alcanzar el punto de gel. A partir de ese momento resulta imposible seguir trabajando con la resina.



Figura 1.13 Resina poliéster y su catalizador (MEK). Fuente: [www.navalcomposites.com](http://www.navalcomposites.com)

Alcanzado el punto de gel, la reacción de polimerización se ve fuertemente incrementada, lo que provoca una gran liberación energética en forma de calor hasta alcanzar el pico exotérmico, completándose así la total solidificación de la resina. Este período de tiempo abarcado entre el punto de gel y el pico exotérmico se conoce como tiempo de polimerización. Al igual que el tiempo de gel, su duración también está influenciado por las cantidades de catalizador y acelerador, la temperatura y la humedad. Por otro lado, el pico exotérmico alcanzado es directamente proporcional al espesor del laminado, provocando temperaturas que pueden llegar a dañar el molde y la pieza. Por esta razón, es conveniente realizar sucesivos laminados de espesor reducido.

Finalmente, pasado el pico exotérmico la temperatura disminuye paulatinamente hasta que igualarse con la temperatura ambiente. Este espacio de tiempo se denomina curado final. La duración de esta última etapa se puede reducir por medio de aportación de calor, es lo que se denomina postcurado y es característico en la gran mayoría de resinas epoxi.

## 2. MATERIALES DE REFUERZO

Hasta el momento, el desarrollo del trabajo se ha centrado exclusivamente en temas relacionados con la matriz. En los siguientes apartados se desviará el foco hacia los materiales de refuerzo y se estudiarán con detenimiento aquellos aspectos más determinantes. Uno de ellos es su formato, y el material de refuerzo se comercializa en tres configuraciones distintas: fibras continuas, fibras discontinuas y partículas.

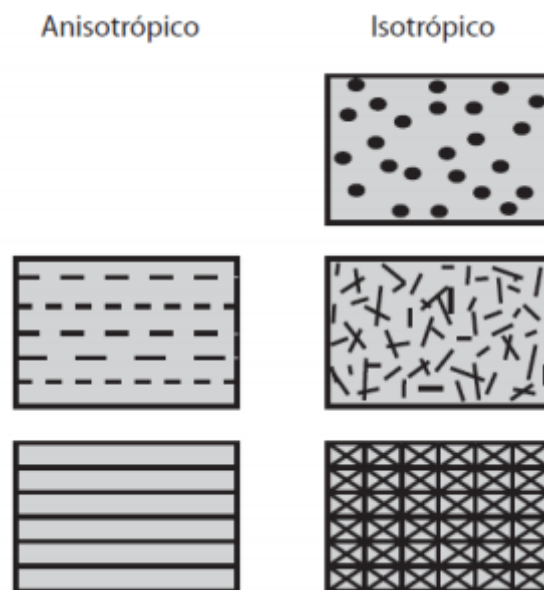


Figura 1.14 Configuraciones del material de refuerzo. Fuente: Baldenebro (2015)

En cuanto al papel que desarrollan los materiales de refuerzo, si por un lado la matriz es la encargada de mantener unido el material de refuerzo y transmitir las cargas a través del material (entre otras funciones), la fase discontinua destaca por conferir las propiedades mecánicas al *composite*. Dichas propiedades se ven incrementadas cuanto mayor porcentaje de refuerzo contiene el material, que varía considerablemente en función de la técnica de moldeo empleada. En el caso de las técnicas de moldeo por contacto, los porcentajes suelen encontrarse entre los valores que muestra la tabla 1.17:

MOLDEO POR CONTACTO	% REFUERZO
Laminación por contacto	25 – 35
Proyección simultánea	20 – 30
Impregnadores	35 – 55

Tabla 1.17 Técnicas de modelo por contacto. Fuente: Besednjak (2005)



Figura 1.15 Máquina de proyección simultánea.. Fuente: Drassanes Dalmau

Al igual que ocurre en el caso de las matrices, el marco de los materiales de refuerzo es muy amplio. Una forma común de clasificarlos es hacerlo según su naturaleza, en la que se diferencian dos grandes bloques: fibras de origen mineral y fibras de origen orgánico.



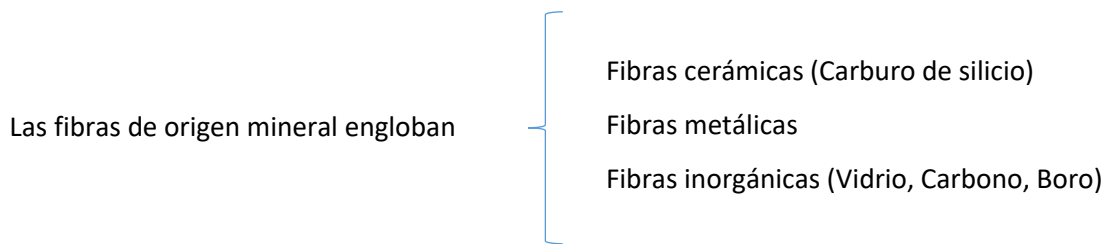


Figura 1.16 Tipos de fibras de origen mineral. Fuente: propia

Por otro lado, en las fibras de origen orgánico se encuentran elementos como la aramida o el polietileno.

*Referente la realización del proyecto, se centra en los Fiber Reinforced Plastics (FRP) que están relacionados con la industria naval. Concretamente la fibra de vidrio, carbono y la aramida. Todas estas fibras, en mayor o menor medida, posibilitan la fabricación de piezas de peso reducido y con buenas propiedades mecánicas, concretamente resistencia a la tracción y rigidez. Otra de las razones que potencian el empleo de estos refuerzos es la facilidad con la que se adaptan a las superficies de los moldes, permitiendo de este modo la realización de formas complejas. La manejabilidad de los refuerzos también se ve incrementada por poseer un alto poder de absorción de las resinas estudiadas. Finalmente, en el apartado económico, el refuerzo de vidrio es sumamente más económico que la fibra aramídica y la fibra de carbono.*

## 2.1 FIBRA DE VIDRIO

La fibra de vidrio es el refuerzo más empleado en el campo de los materiales compuestos. Su fácil acceso, buenas propiedades mecánicas y un precio más que razonable son factores que potencian en gran medida su comercialización.

Como se expuso en el apartado anterior, el *Glass Fiber Reinforced Plastic (GFRP)* forma parte de las fibras de origen mineral, concretamente de las inorgánicas. Están constituidas principalmente por sílice, al cual se le añaden una serie de elementos que facilitan su procesado

para poder obtener una fibra de excelentes propiedades. Uno de estos compuestos es el óxido de sodio, que permite un ahorro energético al reducir considerablemente el punto de fusión del sílice. Pero no todo son ventajas, la presencia de oxígeno siempre es un inconveniente, en el caso de las fibras de vidrio mengua la resistencia química. Para contrarrestar este efecto, se opta por añadir dos silicatos, uno alcalino y otro alcalinotérreo.



*Figura 1.17 Tejido de fibra de vidrio. Fuente: Drassanes Dalmau*

No todas las fibras de vidrio poseen las mismas propiedades, hecho que da lugar la existencia de distintas clases, pero generalmente todas presentan:

### PROPIEDADES DE LA FIBRA DE VIDRIO

- Alta resistencia mecánica, pudiéndose valorar de tres formas distintas:
  - Tenacidad, es la relación entre la carga de rotura y la densidad lineal de la fibra. Se expresa en  $\text{g/tex}^{10}$ .
  - Resistencia a la rotura. Es la tensión máxima que puede soportar la fibra. Se expresa en GPa o  $\text{kg/mm}^2$ .
  - Resistencia kilométrica, equivale a la longitud de hilo necesario para alcanzar un peso de fibra igual que la fuerza de rotura. Se expresa en km.
- Alargamiento de rotura, a pesar de tratarse de un valor difícil de cuantificar, la fibra de vidrio se estira entorno un 2 o 3% respecto su longitud inicial.
- Poca rigidez, dependiendo de la clase de fibra el módulo de Young puede variar entre 70 y 90 GPa.
- Buen comportamiento térmico, posee una baja conductividad y una de sus propiedades más importantes es que es incombustible. Es capaz de mantener sus propiedades físicas incluso a altas temperaturas, concretamente hasta 200°C.
- Baja absorción de humedad, son ideales para la industria naval. No obstante, se debe evitar almacenarla en ambientes húmedos antes de la fase de laminación.
- Alta resistencia a la corrosión, muestra una excelente respuesta ante ácidos, disolventes y agua salada.
- Baja conductividad eléctrica, que acompañada de una baja conductividad térmica potencia que sea un material aislante ideal.
- Excelente unión a la matriz.
- Bajo coste, lo que provoca que sea un material altamente competitivo en el mercado.

Tabla 1.18 Generalidades de la fibra de vidrio. Fuente: Miravete (2007)

*Tex<sup>10</sup>, unidad utilizada para indicar la masa en gramos de 1000 metros de fibra. Se emplea básicamente en el continente europeo.*

### 2.1.1 PROCESADO DE LA FIBRA DE VIDRIO

Para poder comercializar el vidrio en forma de hilo es necesario respetar acuradamente las etapas de fabricación. Este formato de fibra que tanto lo caracteriza es consecuencia de estirar la materia prima bajo una alta aportación de calor. El alargamiento se produce aplicando una carga de tracción al material o bien obligándolo a pasar por unos orificios de diámetro determinado. Finalmente, una vez estirado el material se procede a su solidificación. A continuación, en la figura 1.18 se resumen las diferentes etapas de la fabricación de la fibra de vidrio:

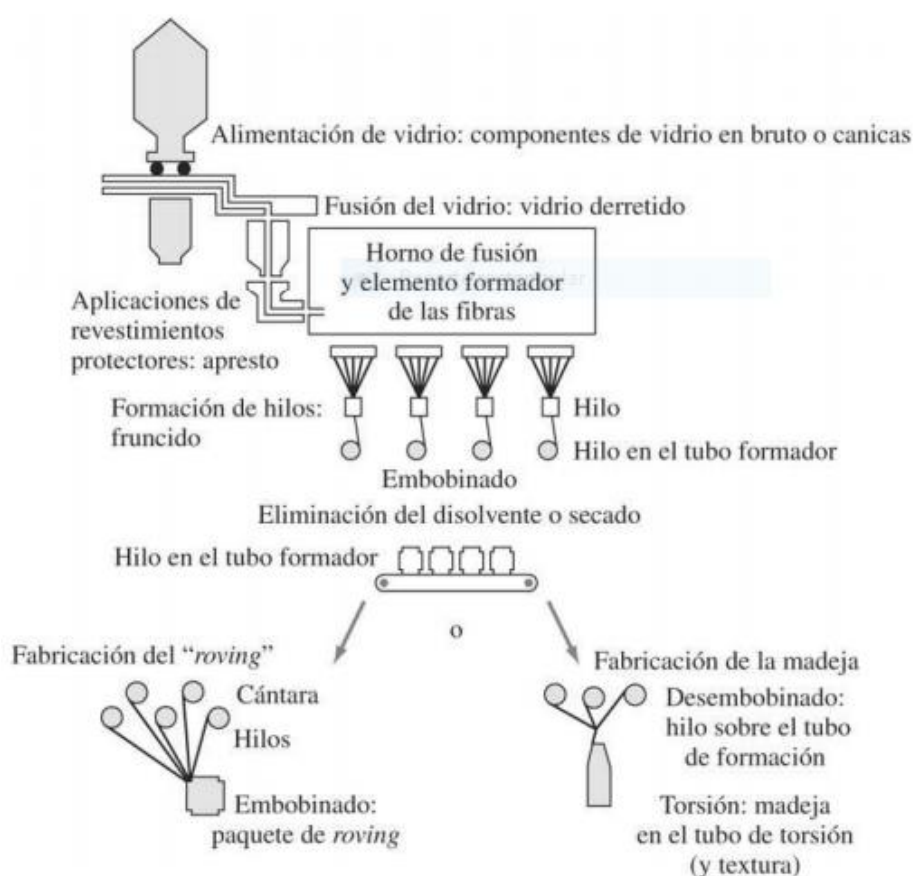


Figura 1.18 Procesado de la fibra de vidrio Fuente: Smith (2006)

- 1) Composición-Fusión. Una vez calculada la cantidad necesaria de cada componente, se realiza la mezcla de los mismos. Posteriormente, se les aporta calor hasta fundir todo el material. Gracias a los silicatos, se consigue el punto de fusión baje hasta los 1550°C, reduciéndose aproximadamente unos 200°C respecto al inicial.
- 2) Fibrado. Después, el vidrio fundido circula a través de unos conductos hasta llegar a unas hileras con la base agujereada. Posteriormente, el material se cuela adquiriendo el

diámetro de estos orificios que pueden adoptar valores comprendidos entre 6 y 8  $\mu\text{m}$ . Las fibras resultantes se estiran velozmente para acto seguido someterlas a un rápido enfriamiento mediante el rociado de agua.

- 3) Ensimaje<sup>11</sup>. Llegado a este punto, las fibras aún no poseen las características mencionadas en el apartado anterior. Requieren de la adición de un ensimaje, el cual se aplica mediante rociado justo después de que salgan de la hilera, cuando la temperatura del material aún se encuentra entre 80 y 120°C. La aplicación del ensimaje es siempre necesaria, y en función de la naturaleza y cantidad de sus componentes determinan que clase de fibra resultará. Se encarga de dotar al material de aspectos básicos como protección contra la abrasión, buena unión fibra-matriz, resistencia a la humedad, evitar la electricidad estática y cohesionar las fibras.
- 4) Secado. Esta última etapa tiene como finalidad eliminar la humedad que puedan albergar las fibras.
- 5) Bobinado. Ensimadas las fibras, el siguiente paso es adoptar un formato con el cual se puedan comercializar. Normalmente las fibras se bobinan hasta obtener ovillos.

### 2.1.2 CLASES DE FIBRA DE VIDRIO

Como ya se ha mencionado, no todas las fibras poseen las mismas propiedades. El mercado ofrece una amplia gama que permite elegir la que más se adapte a la función del material. Los factores que dictaminan a que grupo o clase pertenece una fibra es su propia composición y el ensimaje empleado. En función de estos aspectos, las fibras de vidrio más comunes son las que se muestran en la tabla 1.19:

COMPOSICIÓN (%)					
Compuesto	E	A	C	R	S
<b>SiO<sub>2</sub></b>	55	67,5	66	60	65
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	14	3,5	4	24	25
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0,2	-	-	-	-
<b>B<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	7	1,5	5	-	-

*Ensimaje*<sup>11</sup>, según la RAI (Real Academia de Ingeniería), son productos químicos de naturaleza grasa que se adicionan a las fibras para facilitar su procesado y dotarlas de unas propiedades concretas.

<b>CaO</b>	22	6,5	14	9	-
<b>MgO</b>	1	4,5	3	6	10
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0,5	13,5	3	0,5	-
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0,3	3	5	0,1	-
<b>APLICACIONES</b>					
<b>E</b>	<p><u>Eléctrico.</u> Es el tipo de fibra más comercializado, abarca aproximadamente el 90% de las ventas. Posee una baja conductividad eléctrica y está destinado básicamente a actuar como aislante eléctrico. Es el empleado para la construcción de embarcaciones. También se usa para la fabricación de componentes automovilísticos o instrumentos para la práctica del deporte como por ejemplo esquís o pértigas.</p>				
<b>A</b>	<p><u>Alto contenido en álcali.</u> Los componentes alcalinos lo dotan de una alta resistencia química, ideal para ambientes corrosivos. Por otro lado, su resistencia a la tracción y módulo elástico son inferiores a los del vidrio E.</p>				
<b>C</b>	<p><u>Químico.</u> Se considera una fibra intermedia entre las clases A y E. Sin llegar a poseer la resistencia química que caracteriza a los hilos A, las fibras C se aplican en las caras externas de las piezas para garantizar su vida útil en ambientes corrosivos. Es ideal para la construcción de torres de refrigeración y tanques de agua.</p>				
<b>R ó S</b>	<p><u>Resistencia.</u> Está destinado para situaciones que requieren de una elevada resistencia a la rotura y elevada rigidez. Además, responden excelentemente bajo cargas cíclicas, tienen una buena estabilidad térmica y absorben un porcentaje bajo de humedad. La fibra R se reserva para usos aeronáuticos y aplicaciones militares.</p>				

Tabla 1.19 Composición de la fibra de vidrio y aplicaciones. Fuente: [www.tecnologiadelosplasticos.com](http://www.tecnologiadelosplasticos.com)



*Figura 1.19 Aplicación de las sucesivas capas de fibra de vidrio sobre el molde. Fuente: Drassanes Dalmau*

## 2.2 FIBRA DE CARBONO

De los materiales de refuerzo detallados en el proyecto, la fibra de carbono es la que posee mejores propiedades mecánicas. Se trata de un material que se caracteriza por ser muy rígido y mostrar una alta resistencia a la tracción. Estas peculiaridades, complementadas con una baja densidad originan un material que muestra unas prestaciones extraordinarias. Por otro lado, el impacto económico que supone el construir una pieza con fibra de carbono sigue siendo demasiado elevado a pesar de su abaratamiento en los últimos años. Por lo tanto, su uso se destina a la fabricación de componentes de peso reducido que sean capaces de responder satisfactoriamente en entornos exigentes.



*Figura 1.20 Asta de fibra de carbono. Fuente: Drassanes Dalmau*

Para que el material compuesto resultante sea capaz de cumplir estos parámetros, es necesario realizar una buena elección de la fase continua que complementará a la fibra de carbono. Las matrices que otorgan las mejores cualidades son las epoxi y es por esta razón por la que se suelen emplear con esta clase de fibras.

En cuanto a la naturaleza de este tipo de refuerzo, la fibra de carbono puede proceder de tres materias primas distintas: el poliacrilonitrilo (PAN), el alquitrán y el rayón (derivado de la celulosa). El PAN es la base más empleada para la fabricación de fibra de carbono debido a que su procesado es más económico en comparación con el de las otras materias primas. Independientemente de cual sea el material precursor, la fibra de carbono suele mostrar las siguientes características:



PROPIEDADES DE LA FIBRA DE CARBONO
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Elevada resistencia y módulo elástico.</li> <li>○ Baja densidad.</li> <li>○ Buena respuesta a cargas cíclicas.</li> <li>○ Bajo coeficiente de expansión térmico.</li> <li>○ Alta resistencia a la corrosión.</li> <li>○ Buena conductividad térmica y eléctrica.</li> <li>○ Comportamiento anisótropo.</li> <li>○ Alto poder de adhesión a la matriz.</li> <li>○ Coste elevado.</li> </ul>

Tabla 1. 20 Generalidades de la fibra de carbono. Fuente: Besednjak (2005)

### 2.2.1 PROCESADO DE LA FIBRA DE CARBONO

La fabricación de la fibra de carbono es un proceso costoso. Debido a este motivo, se trata de adoptar distintas vías que reduzcan el coste final del material. Una manera de lograr este objetivo es mediante el empleo de una materia prima que tenga una buena manejabilidad y otorgue facilidades durante todo el proceso. El precursor que cumple estos parámetros es el PAN, que sometido a un proceso de *pirólisis*<sup>12</sup> y *ciclización*<sup>13</sup> logra transformarse en fibra de carbono. Este ciclo está conformado por las siguientes etapas térmicas:

ETAPA	T(°C)	PROCESADO
<b>Estabilización</b>	200 – 300	Las fibras se introducen en un horno hasta alcanzar la temperatura deseada. Al mismo tiempo se estiran para conseguir una estructura molecular que la dote de mayor rigidez.

*Pirólisis*<sup>12</sup>, proceso físico basado en la aportación de calor en un ambiente que no contenga oxígeno con el objetivo de romper una molécula.

*Ciclización*<sup>13</sup>, proceso por el cual se generan estructuras moleculares con forma de anillo a partir de cadenas lineales o ramificadas cuando se produce una reacción química.

<b>Carbonización</b>	1000-1500	En esta etapa se produce la pirólisis. Las fibras se someten a un nuevo calentamiento en un ambiente inerte. Con ello se consigue eliminar el nitrógeno, hidrógeno y oxígeno del PAN dando lugar a la fibra de carbono.
<b>Grafitización</b>	2000	Es una etapa opcional. Normalmente se suele incluir en el procesado y consiste en un último calentamiento que genere fibras de alto módulo elástico.
<b>Ensimaje</b>	Ambiente	Se les añade a las fibras una serie de cargas y aditivos que mejoren la resistencia a la oxidación y la capacidad de adhesión a la matriz.

*Tabla 1.21 Procesado de la fibra de carbono. Fuente: Propia*

*La tabla 1.21 evidencia el motivo principal por el cual la fibra de carbono es tan costosa, la temperatura. Se necesita una gran cantidad de energía para alcanzar el pico exotérmico producido en la etapa de grafitización. Además, hay que considerar el coste económico de toda la infraestructura necesaria que permite alcanzar estas temperaturas. Para finalizar, otro factor que aumenta su coste como material compuesto es que se emplea como matriz resina epoxi, la más cara de las estudiadas.*

## 2.2.2 CLASES DE FIBRA DE CARBONO

La gama de productos de fibra de carbono no es tan amplia como en el de la fibra de vidrio. En este caso únicamente se pueden obtener tres variedades de fibra dependiendo a la temperatura que se hayan expuesto. Los tipos de fibra de carbono son los siguientes:

CLASE DE FIBRA DE CARBONO	PROPIEDADES
<b>Fibra HM (Alto módulo)</b>	Es la que necesita de una mayor aportación de calor. Es la clase de fibra de carbono con mayor rigidez.
<b>Fibra HR (Alta resistencia)</b>	Es el tipo de fibra que puede resistir las tensiones más altas.
<b>Fibra de carbono III</b>	Requieren menores temperaturas durante su procesado y por ende son las más económicas. Muestran una buena resistencia, pero por otro lado su rigidez difiere mucho en comparación con las HR y HM

Tabla 1.22 Tipos de fibra de carbono. Fuente: Miravete (2007)

## 2.3 FIBRA ARAMÍDICA

Los orígenes de la fibra aramídica se remontan al año 1965, siendo su precursora la científica norteamericana *Stephanie Kwolek*. Sin embargo, su comercialización no se produjo hasta mediados de la década de los setenta bajo el nombre de la marca *Kevlar*. Es un material que muestra unas propiedades mecánicas similares al de la fibra de carbono, por lo tanto y de forma genérica cabe esperar una alta resistencia a la tracción, elevada rigidez y una densidad reducida. No obstante, el atributo que caracteriza al *Kevlar* es su capacidad para la absorción de impactos y vibraciones. En general, sus propiedades son:

PROPIEDADES DE LA FIBRA ARAMÍDICA
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Elevada resistencia a la tracción. Es ideal para el amarre de artefactos marítimos. Su resistencia a la rotura puede llegar a ser cinco veces superior a la del acero.</li> <li>○ La rotura del Kevlar se produce de forma progresiva, lo que permite detectar su degradación con cierta antelación y evitar así posibles accidentes.</li> <li>○ Alta rigidez. En función del tipo de fibra aramídica puede variar entre 70 y 130 GPa por lo que el material se deforma poco bajo la acción de grandes esfuerzos.</li> <li>○ Alto poder de absorción de impactos y vibraciones. Esta propiedad implica que sea empleado para la fabricación de chalecos antibalas. En el caso del casco de las embarcaciones absorbe las vibraciones producidas por el motor y los impactos contra el mar.</li> </ul>

- Baja resistencia a la compresión. Sus valores difieren considerablemente en comparación con la tensión de rotura a la tracción.
- Buena resistencia química. El material no se ve deteriorado bajo la acción de componentes químicos. Además, son resistentes al fuego y autoextinguibles.
- Conservación de sus propiedades en un amplio rango de temperaturas. Su comportamiento no se ve afectado entre los -200 y 200°C. A partir de los 425°C la fibra de aramida empieza a carbonizarse.

*Tabla 1.23 Generalidades de la fibra aramídica. Fuente: Miravete (2007)*

Referente a su composición, la fibra de aramida está constituida por un monómero de poliamida aromática. Dicha estructura dota al material de una buena resistencia en el sentido longitudinal de la cadena, sin embargo, en la orientación transversal su resistencia se ve disminuida. A pesar de esto, a nivel general esta clase de refuerzo sigue mostrando unas buenas propiedades, por lo que se suelen emplear con matrices epoxi debido a que maximizan las cualidades de la fibra de aramida.

Todas estas características, y en especial su alto poder para la absorción de impactos, han potenciado su empleo en distintos sectores industriales como el automovilístico, aeroespacial, naval, balístico, etc.



*Figura 1.21 Guante de protección mecánica de kevlar. Fuente: www.dupont.es*

En el campo de la náutica de recreo su uso se destina a la fabricación de cascos ligeros, robustos y que sean capaces de absorber los impactos contra la superficie del mar y por lo tanto proporcionar una navegación más cómoda y segura. Otra salida de la fibra aramídica en el sector naval es la fabricación de velas para embarcaciones de recreo debido a su elevada rigidez y peso reducido.

### 2.3.1 PROCESADO DE LA FIBRA ARAMÍDICA

Para la fabricación de la fibra de aramida se necesita un ambiente inicial extremadamente frío, comprendido entre los -50 y -80°C. Una vez alcanzada la temperatura idónea, se procede a disolver una solución de polímero en un solvente adecuado, generalmente ácido sulfúrico. El solvente desarrolla un papel determinante sobre las características del material, ya que dependiendo de los aditivos que se le agreguen se obtienen unas propiedades u otras. Seguidamente, la mezcla se somete a un proceso de extrusión a alta temperatura, concretamente a 200°C para conseguir la volatilización del solvente. Para finalizar, la fibra resultante es bobinada y lista para comercializarse.

### 2.3.2 CLASES DE FIBRA ARAMIDA

El factor que diferencia los distintos tipos de fibra aramídica es la rigidez. En función de su módulo elástico se diferencian dos productos principales:

CLASE DE FIBRA ARAMÍDICA	PROPIEDADES
<b>Kevlar 29</b>	Muestra una alta resistencia a la tracción y una buena rigidez. Se emplea para la fabricación de paracaídas, chalecos antibalas, cuerdas etc.
<b>Kevlar 49</b>	Posee una resistencia similar a la del Kevlar 29 y un módulo elástico superior. Su uso se reserva para piezas de altos requisitos.

*Tabla 1.24 Tipos de fibra aramídica. Fuente: Smith (2006)*

## 2.4 COMPARATIVA DE LOS MATERIALES DE REFUERZO

El presente apartado pretende comparar las clases de refuerzo estudiados teniendo en cuenta como puntos de estudio las propiedades mecánicas y el coste de las fibras. Se ha optado por estudiar las propiedades más significativas de los materiales. Los resultados son los siguientes:

NATURALEZA	CLASE	RIGIDEZ (GPa)	RESIST. TRACCIÓN (GPa)	RESIST. COMPRESIÓN (GPa)	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )
Vidrio	E	75	3,5	> 0,8	2,58
	A	69	3,1	-	2,5
	S	90	4,5	> 1,1	2,46
	R	85	3,4 - 4,4	-	2,59
Carbono	HR	230	2,6-5	2,88	1,74
	HM	390	2,1-2,7	2,76	1,81
	III	290	3,1	-	1,82
Aramídica	Kevlar 29	60	1,92	0,4	1,44
	Kevlar 49	128	2,94 -3,6	0,4	1,45

Tabla 1. 25 Propiedades mecánicas de los materiales de refuerzo. Fuente: Miravete (2007)

### 1) Propiedades mecánicas.

En términos de rigidez, la tabla 1.25 evidencia que las mejores clases de fibras para soportar esfuerzos son la S y la R. Referente a la densidad, todas las fibras de vidrio poseen una densidad semejante independientemente de su composición, por lo que se concluye que no será un factor determinante si el usuario está convencido de trabajar con fibra de vidrio.

Prosiguiendo con la comparación, la fibra de carbono supera en gran medida las propiedades tanto de la fibra de vidrio como la aramídica, llegando a quintuplicar el módulo de Young de tipo E. La fibra de carbono también muestra la mejor respuesta en situaciones de compresión, sin embargo, su comportamiento a tracción puede verse relegada a un segundo plano dependiendo de la clase de fibra. Estas propiedades y su baja densidad, generan que la fibra de carbono sea un material muy versátil.

Para finalizar, la tabla 1.25 muestra el punto débil de la fibra aramídica, su baja capacidad para soportar esfuerzos de compresión. No obstante, no se cuantifica su elevado poder para la absorción de impactos a pesar de mostrar una densidad inferior a la de la fibra de carbono.

### 2) Aspecto económico.

Como ya se hizo en el caso de las resinas, se vuelve a comparar los precios de los materiales de refuerzo en función de la cantidad demandada. Para una mayor precisión, se ha comparado una misma estructura textil y gramajes similares. Estos son:

PRODUCTO	NATURALEZA	GRAMAJE (g/m <sup>2</sup> )	FORMATO TEXTIL	PRECIO €/m <sup>2</sup>			
				1-4 m <sup>2</sup>	5-10 m <sup>2</sup>	21-30 m <sup>2</sup>	50 m <sup>2</sup>
VV-250	Vidrio	246	Tejido	2,54	2,54	2,54	2,54
GG-206	Carbono	200	Tejido	27,74	25,80	19,20	15,36
KK-300	Aramídica	305	Tejido	-	-	-	22,71

Tabla 1.26 Costes de los materiales de refuerzo. Fuente: Mel Composites

*De los datos extraídos de la tabla 1.26 se entrevé el motivo por el cual la fibra de vidrio es el refuerzo predominante en el campo de FRP. Su dominio es tan evidente que en el caso de este proveedor su precio no se ve modificado en función de la cantidad demandada. Por otro lado, se encuentran la fibra de carbono y la aramídica, las cuales superan con creces el valor de la fibra de vidrio, llegando a multiplicar por un factor de 6 y 9 respectivamente si se necesitara cubrir una superficie de 50 m<sup>2</sup>. Con estos datos se argumentan los motivos por los cuales tanto la fibra de carbono y aramídica se reservan para aplicaciones especiales, permitiendo que la fibra de vidrio abarque la gran mayoría de aplicaciones.*

### 3. FORMATOS TEXTILES

A continuación, se muestran los distintos formatos en los que se suele comercializar el material de refuerzo. Lógicamente, no todas las estructuras textiles poseen las mismas cualidades, por lo que una buena elección incrementa considerablemente la probabilidad de obtener un material compuesto de garantías. Para que esto suceda, previamente se deben valorar los requisitos que ha de presentar la pieza resultante, haciendo especial hincapié en la carga aplicada y su orientación. Algunos de los factores que caracterizan las estructuras textiles son:

- La orientación de las fibras.
- Gramaje.
- Impregnabilidad.
- Espesor.
- Posible existencia de nudos.

De acuerdo con estos parámetros, las estructuras textiles se pueden clasificar de la siguiente manera:

FIELTROS	SISTEMAS NO MALLADOS	PREFORMAS TEXTILES
Hilos cortados	Tejidos (Tela, sarga, satén)	Braiding
Hilos continuos	Ensamblados (Unidireccionales, biaxiales, triaxiales, cuatriaxiales y multiaxiales)	3D Weaving
Superficie	Trenzados	Weft-Knitting
		Warp-Knitting

Tabla 1.27 Clasificación de las estructuras textiles. Fuente: Propia

### 3.1 FIELTROS

Los fieltros son el formato textil más sencillo que ofrece el mercado. Comúnmente se les hace referencia bajo el término “*mat*”. Este concepto proporciona la densidad superficial del fieltro, es decir, un *mat* 300 tiene una masa equivalente a 300 gramos por metro cuadrado. Son estructuras fácilmente identificables debido a que las fibras constituyentes no siguen ningún tipo de patrón, sino que se disponen de forma aleatoria independientemente de si se emplean hilos cortados o continuos.





*Figura 1.22 Rollos de Mat 300 y Mat 600. Fuente: Drassanes Dalmau*

El proceso de fabricación es similar para todas las clases de fieltros. En el caso de los *mats* de hilos cortados se cortan las fibras de manera que todas muestren la misma dimensión. Seguidamente, los hilos se unen debido a la acción de un ligante químico que otorga consistencia a la estructura. Cuando se emplean en la capa exterior del laminado reciben el nombre de fieltro de superficie, el cual tiene como finalidad aumentar la protección frente al ambiente exterior. Por otro lado, la confección de *mats* de hilos continuos suprime la etapa de cortado y las fibras se entrelazan caóticamente por toda la superficie. Este tipo de fieltros requieren una menor cantidad de ligante y se adaptan con mayor facilidad a la superficie del molde.

Generalmente, los *mats* se caracterizan por poseer bajas propiedades mecánicas. Su módulo elástico y resistencia provocan que no sea la estructura textil idónea para piezas de altas prestaciones. Además, el hecho de que las fibras no muestren ninguna orientación determinada implica que estas propiedades sean idénticas en todas las direcciones contenidas en el plano. En contrapartida, los fieltros destacan por una gran manejabilidad debido a que poseen un alto grado de impregnación y son compatibles con todo tipo de resina. Todos estos rasgos causan que su empleo esté destinado a otorgar una mayor adherencia entre las distintas capas de laminado.

### 3.2 TEJIDOS

Previamente a la descripción de las distintas clases que engloba esta estructura textil es importante aclarar el concepto de tejido. La peculiaridad de los tejidos es que están compuestos por dos elementos principales, la trama y la urdimbre. Ambas fibras muestran direcciones perpendiculares entre sí, orientadas de forma transversal y longitudinal respectivamente, que como resultado de su entrelazado producen la existencia de los característicos nudos de los tejidos.



*Figura 1.23 Tejido de fibra de carbono. Fuente: Drassanes Dalmau*

Las propiedades mecánicas de los tejidos superan las prestaciones de los fieltros y a diferencia de éstos pueden ser o no isotrópicos en el plano. Esto se consigue mediante la variación de cantidad de fibra en un sentido u otro. La principal diferencia entre los fieltros y los tejidos recae en que los últimos muestran un patrón claramente definido, provocando que no haya zonas con distintos espesores y/o gramajes y por lo tanto otorgando al material regularidad respecto a sus propiedades. Al mismo tiempo, son estructuras que permiten trabajar con facilidad ya que al igual que los *mats* se deforman e impregnan con facilidad. A continuación, se detallan los diferentes tipos de tejidos mencionados en la tabla 1.27:

- Tela. Las fibras de trama y urdimbre se entrelazan de forma alternativa. La trama pasa una vez por encima y otra por debajo generando ligamentos en el tejido. Normalmente los gramajes de las telas están comprendidos entre 150 y 1000 gr/m<sup>2</sup>.

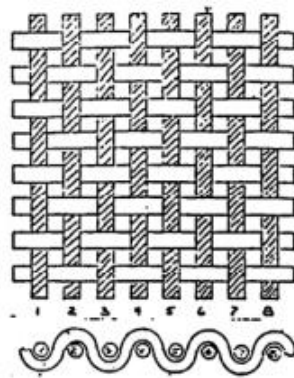


Figura 1.24 Tela. Fuente: Poveda

- Satén. En este tipo de estructura la densidad de ligamentos disminuye considerablemente. El patrón establecido obliga a que la urdimbre pase por encima de cuatro tramas para posteriormente pasar por debajo de la quinta. Seguidamente se vuelve a iniciar la secuencia. Esto provoca que por una cara del tejido se observe mayoritariamente la trama y por la opuesta la urdimbre.

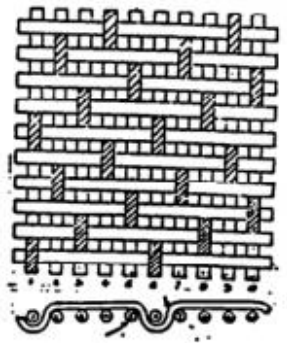


Figura 1.25 Satén. Fuente: Poveda

- Sarga. En el caso de esta estructura la urdimbre pasa por debajo de dos o tres hilos de trama para que seguidamente pase por encima de la siguiente. La trama y la urdimbre se alternan de forma que los nudos resultantes generen líneas diagonales.

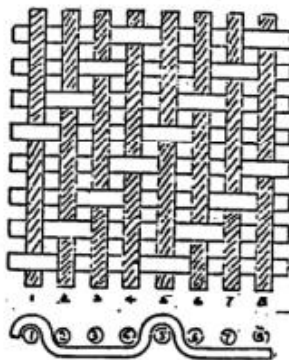


Figura 1. 26 Sarga. Fuente: Poveda

### 3.3 ENSAMBLADOS

Este tipo de estructura presenta notables diferencias respecto a los fieltros y los tejidos. Referente a los primeros, las fibras de los ensamblados sí que muestran un orden y orientación determinados, ambas características son imperceptibles en el caso de los *mats*. Por otro lado, los ensamblados también siguen un patrón predeterminado como en el caso de los tejidos, sin embargo, carecen de la existencia de ligamentos. Por lo tanto, los ensamblados están constituidos por una serie de niveles en los que todas sus fibras están orientadas en la misma dirección. Para que la estructura sea consistente, se unen las distintas capas mediante la ayuda de una fibra auxiliar que proporcione solidez a la estructura sin dañar sus propiedades.

El hecho de que los ensamblados contengan varios niveles en su composición permite la modificación de las propiedades de los mismos. Es decir, las capas se pueden colocar con diferentes orientaciones en función de los esfuerzos a los que se someta la pieza final. Con ello lo que se pretende es conseguir un material de mayor versatilidad ya que su isotropía se verá incrementada. En función de la distribución de las capas los ensamblados pueden ser: unidireccionales, biaxiales, triaxiales o multiaxiales.

En cuanto a propiedades, ni fieltros ni tejidos mejoran la respuesta mecánica de los ensamblados.

## CAPÍTULO 2 MODELADO DE LA EMBARCACIÓN

Con el comienzo del segundo bloque también se da paso a la parte práctica del proyecto. En él se trata de llevar a cabo el modelado 3D de una embarcación, reparando especial atención en las formas del casco. Para poder realizarlo es sumamente importante elegir correctamente el modelo y emplear las herramientas adecuadas. En este caso se hace uso de dos programas: *Rhinoceros* y *Maxsurf*, softwares especializados en *Computer Aided Design (CAD)* y *Computational Fluid Dynamics (CFD)* respectivamente. El primero permite realizar el modelado de todas las superficies de la embarcación, mientras tanto el segundo se emplea para ajustar ciertos parámetros del casco y simular el comportamiento dinámico de la embarcación.

ETAPAS DEL MODELADO			
1º	2º	3º	4º
Elección del modelo que se ajuste a la capacidad de trabajo.	Generación de las formas mediante <i>Rhinoceros</i> .	Comprobación y comportamiento dinámico del casco mediante <i>Maxsurf</i> .	Corrección y optimización de la embarcación.

Tabla 2.1 Ciclo del modelado 3D de la embarcación. Fuente: Propia

Con el objetivo de ejecutar el proyecto con éxito y de manera eficiente es importante detectar y corregir todos los errores en el proceso de diseño, ya que subsanar estos defectos en etapas más avanzadas suele implicar una mayor inversión de tiempo de trabajo, y por lo tanto de dinero en los casos reales.

### 1. ELECCIÓN DEL MODELO

Tras la búsqueda y valoración de diferentes embarcaciones para la construcción del modelo 3D se ha optado por la elección de una motora de dimensiones reducidas llamada “*Caballero*”. Dicha embarcación se ha extraído del portal web [www.shipmodell.com](http://www.shipmodell.com) dedicada exclusivamente al modelismo naval. En esta dirección se pueden consultar una amplia gama planos de formas de distintos tipos de veleros y motoras e incluso fragatas y galeones.

Esta embarcación fue diseñada por el arquitecto naval Charles M. Ungerbuehler, quien trató de diseñar una pequeña motora que al mismo tiempo resultara espaciosa, rápida, cómoda y fácil de construir. En cuanto a su comportamiento, su arquitecto destaca que muestra un buen

comportamiento condiciones adversas además de una gran maniobrabilidad y suavidad a la hora de virar. Las dimensiones de la embarcación se recogen en la tabla 2.2:

DIMENSIONES	
Eslora $LOA^{14}$ (m)	5,79
Eslora de flotación $LWL^{15}$ (m)	5,33
Manga (m)	1,96
Calado (m)	0,23
Desplazamiento (kg)	793,78
Coefficiente de bloque	0,428
Coefficiente prismático	0,723
Superficie mojada (m <sup>2</sup> )	7,30
Área del plano de flotación (m <sup>2</sup> )	6,55

Tabla 2.2 Dimensiones de la embarcación Caballero. Fuente: [www.shipmodell.com](http://www.shipmodell.com)

En el apartado propulsivo, la motora emplea motores fueraborda de distinta potencia dependiendo de las necesidades del usuario. La ficha técnica aconseja que se opte por una de las siguientes combinaciones que se muestran en la tabla 2.3:

Nº DE MOTORES	POTENCIA DE CADA MOTOR (HP)	VELOCIDAD MÁXIMA (kn)
1	25	17
2	25	27
1	33	21

Tabla 2.3 Opciones de propulsión de la embarcación Caballero. Fuente: [www.shipmodell.com](http://www.shipmodell.com)

$LOA^{14}$ , abreviatura de length over all. Hace referencia a la distancia longitudinal entre los puntos situados más a proa y popa de la embarcación.

$LWL^{15}$ , abreviatura de length water line. Distancia longitudinal entre los puntos más a proa y popa situados en el plano de flotación.

Al mismo tiempo, se desaconseja hacer uso de un único motor de potencia inferior a los 25 HP. En esta situación su gobernabilidad puede verse gravemente afectada y por lo tanto repercutir a la integridad de la embarcación y los pasajeros.

Dejando a un lado los datos técnicos de la motora, la elección de modelar esta embarcación está motivada básicamente por la accesibilidad de la misma. Es decir, se han priorizado dos aspectos primordiales como son el título náutico requerido y las inspecciones a las que debe someterse la embarcación de recreo.

Los reconocimientos a los que están expuestas las embarcaciones varían en función de la eslora y la lista a la que pertenezcan. A continuación, se expone una tabla que avala la elección de la motora *Caballero*:

Tipo de reconocimiento	Lista	Eslora (m)	Periodicidad
Periódico	7ª	$L < 6$	Sin caducidad
Periódico	7ª	$6 \leq L \leq 24$	Máximo 5 años
Periódico	6ª	$2,5 \leq L \leq 24$	Máximo 5 años
Intermedio	6ª	$L \geq 6$	Entre el segundo y tercer año siguientes al reconocimiento inicial o periódico.
Intermedio	7ª	$L \geq 15$	Entre el segundo y tercer año siguientes al reconocimiento inicial o periódico.
Intermedio	7ª	$L \geq 6$ (Casco de madera)	Entre el segundo y tercer año siguientes al reconocimiento inicial o periódico.
Adicional	Todas	$2,5 \leq L \leq 24$	-
Extraordinario	Todas	$2,5 \leq L \leq 24$	-

Tabla 2.4 Reconocimientos de las embarcaciones de recreo. Fuente: Apuntes de la asignatura de Inspección de embarcaciones de recreo

La tabla 2.4 muestra como la motora escogida únicamente se inspeccionaría una vez, en el reconocimiento inicial para obtener el certificado de navegabilidad. Incluso ésta se podría evitar si la embarcación estuviera provista del marcado “CE”, el cual permite expedir directamente el certificado de navegabilidad a todas las embarcaciones de eslora inferior a seis metros.

Por otro lado, el segundo factor que facilita la accesibilidad a esta embarcación es la titulación náutica necesaria que permite su navegación. De esta forma el número de potenciales usuarios aumenta en gran medida ya que puede ser gobernada por cualquier persona que disponga de alguna de las titulaciones náuticas. La tabla 2.5 expone las dos titulaciones náuticas más elementales:

TÍTULO NÁUTICO	GOBERNABILIDAD	ESLORA MÁXIMA	DISTANCIA MÁXIMA A PUERTO
<b>Licencia de navegación</b>	Motos náuticas de clase C y motoras de potencia adecuada según indicaciones de fabricante.	$L \leq 6 \text{ m}$	2 mn en navegaciones diurnas.
<b>Patrón para navegación básica (PNB)</b>	Motos náuticas, motoras y veleros.	$L \leq 8 \text{ m}$	5 mn

Tabla 2.5 Titulaciones náuticas básicas. Fuente: Apuntes de la asignatura de Inspección de embarcaciones de recreo

Con la motora seleccionada es suficiente con disponer de alguna de los títulos más básicos, siempre y cuando tenga asignada una categoría de diseño que le permita alcanzar la máxima distancia establecida. Cada categoría de diseño permite abarcar unas zonas de navegación u otras, el funcionamiento es el siguiente:



CATEGORÍA DE DISEÑO	ZONAS ACCESIBLES	ZONA DE NAVEGACIÓN	DISTANCIA MÁXIMA (mn)
<b>A. Oceánicas</b>	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	1	Ilimitada
		2	60
<b>B. En alta mar</b>	2, 3, 4, 5, 6, 7	3	25
		4	12
<b>C. En aguas costeras</b>	4, 5, 6, 7	5	5
		6	2
<b>D. En aguas protegidas</b>	7	7	Aguas costeras protegidas, puertos, ríos, etc.

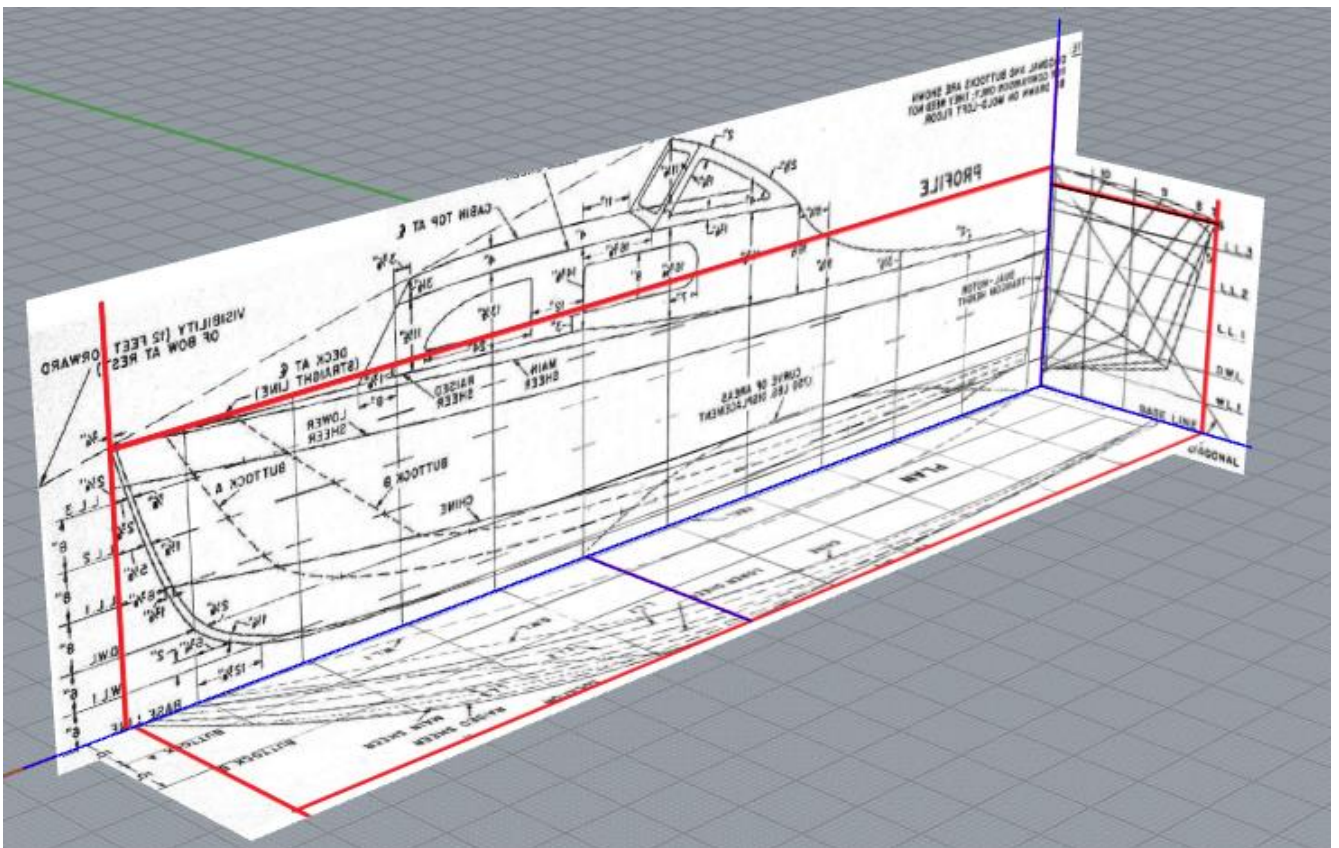
Tabla 2.6 Categorías de diseño y zonas de navegación. Fuente: Apuntes de la asignatura de Inspección de embarcaciones de recreo

De todos los factores expuestos en las tablas anteriores, siempre será el más restrictivo el que dictamine la máxima distancia de navegación. Es decir, en el caso de la motora Caballero si el usuario dispusiera del patrón para navegación básica sería interesante que la embarcación perteneciera a la categoría de diseño C para poder alcanzar así las 5 mn establecidas por la titulación náutica.

## 2. MODELADO DE LA EMBARCACIÓN

Argumentada la elección de la motora escogida, es el momento de iniciar la reconstrucción del modelo 3D a partir de sus planos de formas. Este proyecto centra especial atención al casco de la embarcación, por lo que se trata de trabajar con la mayor precisión en esta zona. Intentar replicar otros elementos de la embarcación es francamente complicado partiendo de un limitado dominio del programa *Rhinoceros*. Por esta razón, en algunas ocasiones se opta por realizar formas más sencillas que se asemejen a las originales. En los siguientes apartados se detallan los pasos efectuados hasta alcanzar el modelo final. En ellos se añaden material gráfico y algunos de los comandos empleados con el objetivo de facilitar la comprensión y animar al lector a modelar su propio casco.

El siguiente paso es situar correctamente las tres vistas en el espacio. Para facilitar esta acción se dibujan los tres ejes orientativos cuyo inicio se emplea como punto de referencia de la embarcación. En este caso, se encuentra en el punto que intersecan el plano longitudinal con la línea base y la cuaderna nº 0.



En la figura 2.1 se observan las trazas mencionadas, las rojas para el dimensionamiento y las azules para su colocación.

Como se comentó anteriormente, a medida que se avanza en la etapa de diseño se van añadiendo tablas que detallan los comandos empleados, su localización en la interfaz de *Rhinoceros* y la finalidad con la que se han usado en el trabajo.



COMANDO	LOCALIZACIÓN	FINALIDAD
<b>IMAGEN</b>	Escribir “Imagen” en la barra de comandos.	Insertar los planos de la motora.
<b>POLILÍNEA</b>	Estándar > Polilínea 	Dibujar los tres ejes orientativos. Líneas azules de la figura 2.1.
<b>ESCALAR</b>	Transformar > Escalar 2D 	Modificar el tamaño de la imagen hasta alcanzar la eslora y manga deseada.
<b>MOVER</b>	Transformar > Mover 	Colocar el punto de referencia estimado de modo que coincida con el origen de los ejes.

Tabla 2.7 Comandos empleados para la parametrización y colocación de planos. Fuente: Propia

Concluida la etapa de parametrización y colocación de los planos ya se puede comenzar a trabajar con las formas del casco. No obstante, antes cabe esclarecer que solo se trabaja con la mitad de la embarcación para sacar partido de su simetría y por lo tanto optimizar el proceso de modelado.

Continuando con el diseño, el siguiente propósito es calcar con exactitud las cuadernas y líneas de agua del casco para seguidamente colocarlas en su ubicación correspondiente. En esta ocasión se ha vuelto a optar (como ya se hizo en el caso de los planos) por dibujar unas líneas de referencia que faciliten esta tarea. Es importante mencionar que durante el calco de las cuadernas se añade una pequeña dificultad, ya que la caja de cuadernas muestra las cuadernas posteriores (de la 0 a la 4) en un costado y las delanteras (de la 5 a la 10) en otro, por lo que se tiene que realizar una simetría de modo que todas las cuadernas queden situadas en un mismo costado.

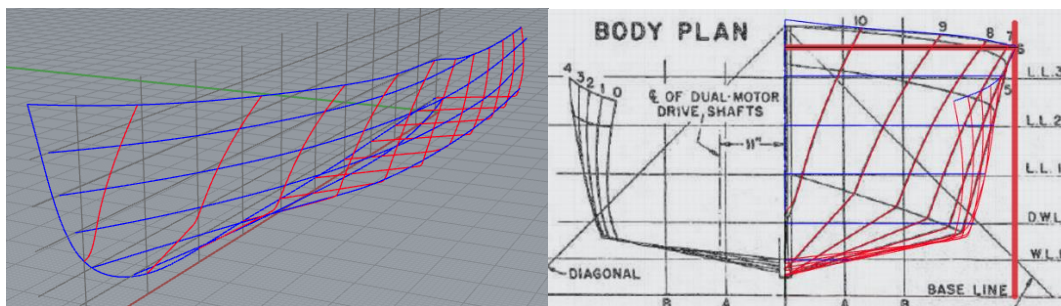


Figura 2.2 Calco de cuadernas y líneas de flotación. Fuente: Propia

La figura 2.2 muestra las cuadernas calcadas en color rojo y las líneas de agua en color azul. Las de tonalidad gris sirven de referencia para la colocación de las dos anteriores. El motivo por el cual las líneas son de diferentes colores es porqué forman parte de capas distintas, de este modo se puede trabajar de una forma más cómoda y diferenciar a que elemento de la embarcación pertenece cada línea.

En la figura 2.2 también se intuye la forma final del casco, únicamente queda dotarlo de una superficie. El programa *Rhinoceros* ofrece una gran cantidad de opciones para generar superficies, por lo que se ha de valorar cual es la que mejor se adapta en cada contexto. En esta circunstancia se estima oportuno crearla a través del comando “*Superficie desde red de curvas*” ya que las cuadernas y flotaciones conforman una malla.

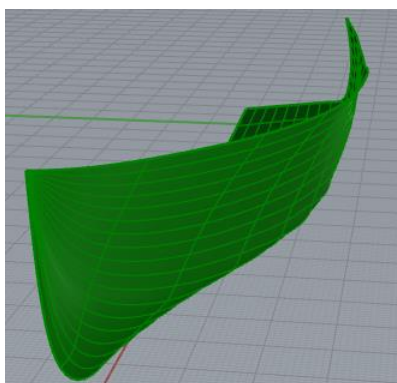


Figura 2.3 Casco de la embarcación. Fuente: Propia

En la imagen se observa la superficie resultante que genera este comando. El procedimiento para llegar hasta este punto no es complicado, más bien tedioso debido a que se deben ajustar con precisión cada una de las líneas. Los comandos empleados para el diseño del casco son:




COMANDO	LOCALIZACIÓN	FINALIDAD
<b>CURVA DE PUNTOS DE CONTROL</b>	Curvas > Curva desde puntos de control 	Calcar las cuadernas y las líneas de agua.
<b>MOVER</b>	Transformar > Mover 	Ubicar las cuadernas y las líneas de agua en su lugar correspondiente.
<b>SUPERFICIE DESDE RED DE CURVAS</b>	Superficies > Superficie desde red de curvas 	Generar la superficie del casco.

Tabla 2.8 Comandos empleados para la generación del casco. Fuente: Propia

En la figura 2.3 también se aprecia que el casco de la embarcación carece de espejo de popa. Con la intención de realizarlo con la mayor precisión posible, se opta por prolongar longitudinalmente la *aleta*<sup>16</sup> del casco. A continuación, desde la vista lateral se calca la línea del espejo de popa que se emplea para recortar la superficie sobrante de la prolongación anterior.

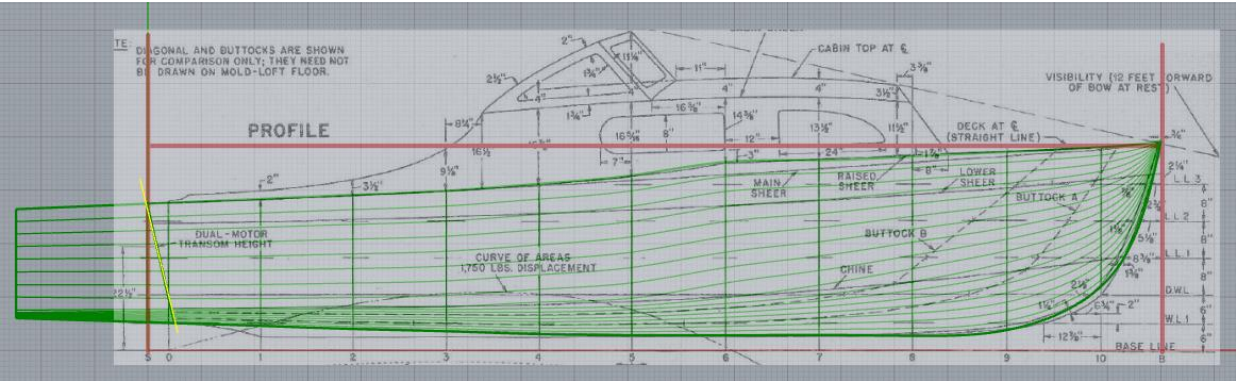


Figura 2.4 Prolongación del casco de la embarcación. Fuente: propia

En la figura 2.4 se puede ver la prolongación de la parte posterior del casco y en color amarillo la línea empleada para recortar la superficie.

Una vez alcanzado este punto, únicamente queda generar la superficie del espejo de popa. En esta ocasión, de todos los comandos que dispone el programa el que más se adapta es el de “Superficie desde curvas planas”, ideal para dibujar superficies cuyos elementos se puedan

<sup>16</sup>Aleta, parte posterior de los costados de una embarcación, por lo que se distingue entre aleta de babor y aleta de estribor.



agrupar en un mismo plano. Pero antes, para poder ejecutar esta acción se debe delimitar dicha superficie. Para ello se traza una línea paralela a la empleada para eliminar la superficie prolongada (línea amarilla de la figura 2.4) con origen en la parte central inferior del espejo de popa. El otro extremo de la recta se une con el vértice superior del casco tal y como se observa en la figura 2.5.

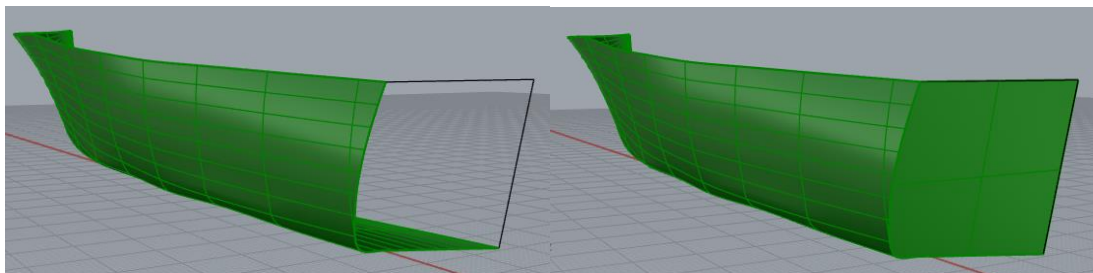


Figura 2.5 Generación del espejo de popa. Fuente: Propia

Seguidamente se unen las dos superficies obteniendo como resultado la cara exterior del casco de la embarcación. En cuanto a los comandos, las acciones esenciales para la construcción del espejo de popa son:

COMANDO	LOCALIZACIÓN	FINALIDAD
<b>POLILÍNEA</b>	Estándar > Polilínea 	Trazar las líneas que delimitan el espejo de popa. También se utiliza para crear la línea de corte.
<b>RECORTAR</b>	Escribir “Recortar” en la barra de comandos.	Eliminar la superficie sobrante de la prolongación de la parte posterior del casco.
<b>SUPERFICIE DESDE CURVAS PLANAS</b>	Superficies > Superficie desde curvas planas 	Generar la superficie del espejo de popa.
<b>UNIR</b>	Estándar > Unir 	Ensamblar las dos superficies que conforman el casco.

Tabla 2.9 Comandos empleados para la generación del espejo de popa.

Con este último comando se ha creado una única superficie, por lo que todavía resta dotar de cierto espesor al casco para poder considerarlo un sólido. El siguiente objetivo es dibujar una superficie equidistante con respecto a la primera a una distancia de 15 mm mediante el comando “Desfasar superficie”, de manera que conformen la cara interior y exterior del casco respectivamente. Acto seguido, se debe eliminar la superficie que rebase el plano longitudinal para evitar posibles errores cuando se vaya a llevar a cabo la simetría de la embarcación. El resultado de la operación son dos superficies oblicuas paralelas, y por lo tanto siguen sin conformar un sólido.

Para alcanzar esta meta es necesario que los extremos de las superficies se conecten y encierren un volumen. Es decir, se requiere crear una nueva superficie de transición que una ambas caras del casco. La operación de “Mezclar superficies” es idónea en estas situaciones ya que permite ajustar algunos parámetros de posición con respecto a las dos superficies.

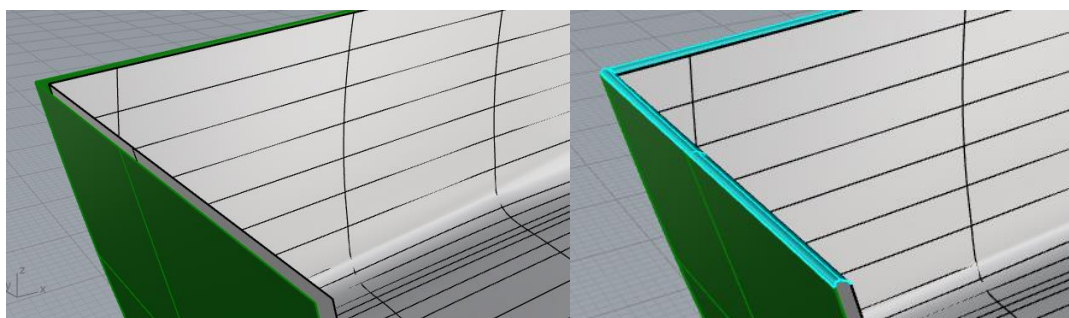



Figura 2.6 Superficie interior del casco y superficie de transición. Fuente: Propia

La figura 2.6 muestra en color gris la superficie resultante de desfasar la cara exterior del casco. En la parte derecha también se observa en color cian la unión suave de las dos superficies. Remarcar que la parte lateral del espejo de popa no está unida debido a que quedará completamente cerrada cuando se realice la simetría del casco, obteniéndose así el sólido deseado.

Los últimos comandos necesarios para la finalización del casco se recogen en la tabla 2.10:

COMANDO	LOCALIZACIÓN	FINALIDAD
<b>DESFASAR SUPERFICIE</b>	Superficie > Desfasar superficie 	Crear la cara interior del casco.



<b>RECORTAR</b>	Escribir “Recortar” en la barra de comandos.	Eliminar la superficie que traspase el plano longitudinal.
<b>MEZCLAR SUPERFICIES</b>	Superficie > Mezclar superficie 	Crear una superficie de transición que una las dos caras del casco.
<b>UNIR</b>	Estándar > Unir 	Ensamblar todas las superficies del casco.

Tabla 2.10 Comandos empleados para la generación de las superficies del casco. Fuente: Propia

## 2.2 MODELADO DE LA CABINA

Concluido el modelado del casco, es el turno de iniciar el diseño de la cabina. Las etapas iniciales de este apartado muestran algunas similitudes con respecto a la construcción del casco. Una de ellas es la necesidad de emplear un plano previamente parametrizado que sirva de orientación para calcar ambos bordes de la cabina, el superior y el inferior. El calco del borde inferior no implica demasiadas complicaciones, simplemente consiste en ajustar correctamente los puntos de control de la curva desde la vista de planta hasta que se obtenga la forma deseada. Después se debe desplazar verticalmente hasta la altura determinada por los planos.

Por el contrario, dibujar el borde superior de la cabina no es tarea sencilla. El problema radica en que éste está dotado de cierta curvatura y no se encuentra en ninguno de los tres planos de construcción. Afortunadamente, el programa dispone de un comando que permite generar una curva a partir de dos curvas albergadas en dos planos distintos. Es decir, en el caso de la cabina primeramente se ha de calcar el borde superior en la vista de perfil. Acto seguido, ya desde la planta, se traza la curvatura deseada para el borde superior para que, tras aplicar el comando, éste adopte la trayectoria de la curva como si se tratase de una “pegatina”.



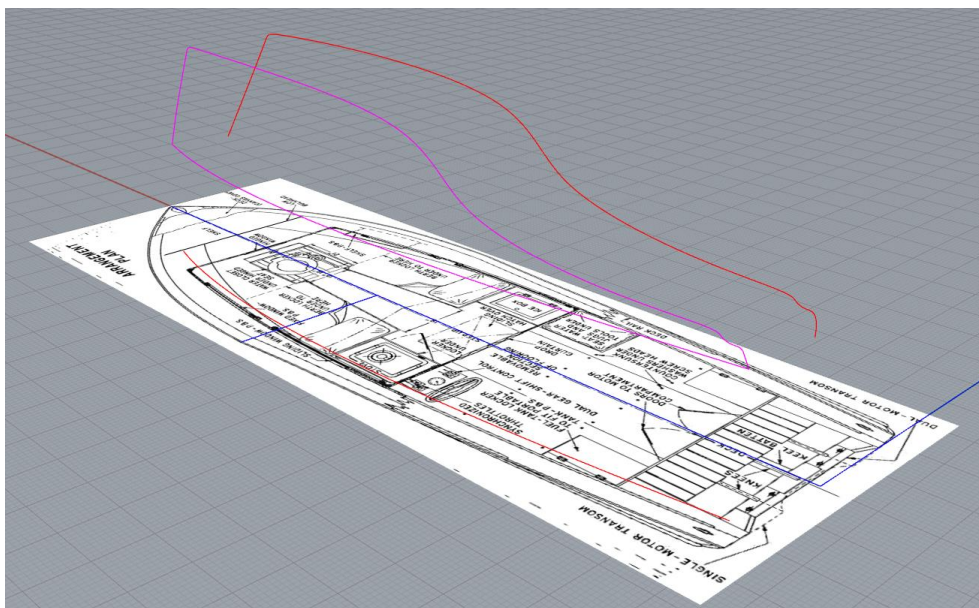


Figura 2.7 Trazado del borde superior de la cabina. Fuente: Propia

En la figura 2.7 se puede ver como la curva de color magenta superior es el resultado de que el borde superior dibujado en el perfil trace la trayectoria de la línea roja de la planta. Además, también se observan las líneas azules empleadas para la correcta parametrización del plano.

Una vez dibujados los bordes de la cabina ya se puede generar la superficie lateral a través de un nuevo comando denominado “Superficie a partir de 2, 3 o 4 aristas”. Esta operación es muy versátil ya que crea una superficie muy precisa únicamente partiendo del contorno de los elementos a construir.

A continuación, se debe extruir la superficie para dotar de volumen a la cabina. Dado de que se trata de una superficie oblicua, se opta por extruirla hasta cerciorarse de que todo el conjunto rebasa ligeramente el plano longitudinal. Este mismo plano servirá para eliminar las pequeñas superficies que lo traspasan para posteriormente poder realizar la simetría de la cabina correctamente.

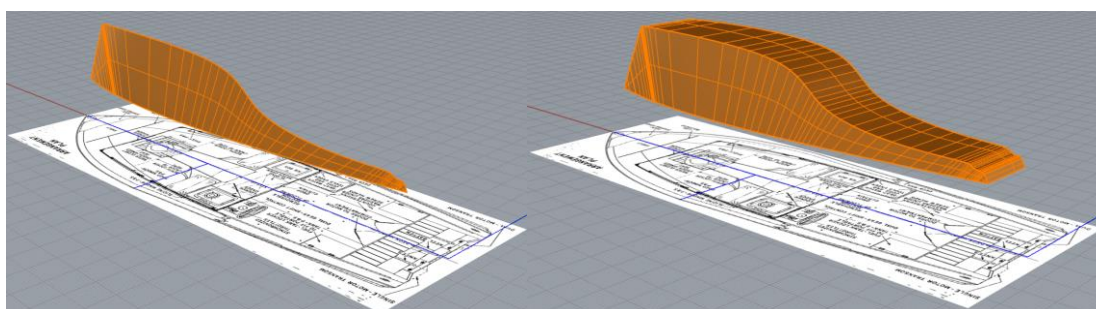


Figura 2.8 Construcción de la cabina. Fuente: Propia

De forma resumida, los comandos aplicados para modelar la primera parte de la cabina son los siguientes:





COMANDO	LOCALIZACIÓN	FINALIDAD
IMAGEN	Escribir “ <i>Imagen</i> ” en la barra de comandos.	Insertar el plano de cubierta.
CURVA DE PUNTOS DE CONTROL	Curvas > Curva desde puntos de control 	Calcar los bordes de la cabina.
MOVER	Transformar > Mover 	Desplazar verticalmente el borde inferior de la cabina.
CURVA DESDE 2 VISTAS	Curvas > Curva desde 2 vistas 	Dotar de la curvatura estimada al borde superior de la cabina.
SUPERFICIE A PARTIR DE 2, 3 O 4 ARISTAS	Superficies > Superficie a partir de 2, 3 o 4 vistas 	Generar la superficie a partir de los contornos de la cabina.
EXTRUSIÓN	Sólido > Extrusión de curva plana > Recta	Crear un sólido partiendo de la superficie generada.
RECORTAR	Escribir “ <i>Recortar</i> ” en la barra de comandos.	Eliminar las superficies que rebasen el plano longitudinal.

Tabla 2.11 Comandos empleados para la construcción de la cabina I. Fuente: Propia

Continuando con el modelado, ahora es el momento de crear el espacio adecuado para la bañera. Para lograrlo se ha de eliminar parte del sólido que se ha extruido recientemente, pero antes se debe trazar adecuadamente la línea que delimite el contorno de la bañera. Probablemente se trate de uno de los pasos de diseño más complejos, por lo que es trascendental enfocar correctamente la solución. El planteamiento propuesto consta de dos etapas bien diferenciadas.

La primera consiste en desfasar (crear una superficie equidistante) la superficie lateral de la cabina y acto seguido desplazarla ligeramente hacia arriba de modo que interseque con la

superficie superior de la cabina. El propósito es que de la intersección entre ambas se genere una curva contenida en el cuerpo de la cabina tal y como se muestra en la imagen.

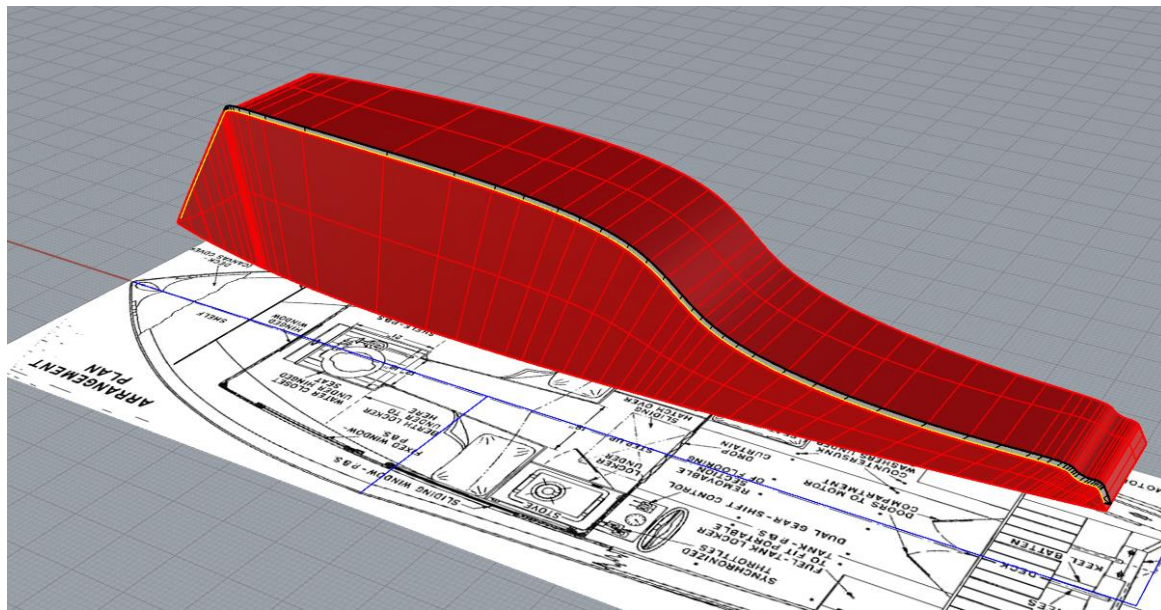


Figura 2.9 Contorno de la bañera I. Fuente: Propia

La figura 2.9 muestra ligeramente el borde superior de la superficie desfasada. Al mismo tiempo, en color amarillo la curva resultante de la intersección de las dos superficies. Remarcar que se ha cambiado el color de la capa de la cabina para facilitar la visualización de la nueva curva.

Por otro lado, la segunda fase tiene como base de trabajo el plano de cubierta. Éste posibilita calcar correctamente la parte delantera de la bañera, todo ello desde la vista de planta. Acto seguido, el contorno de la bañera se proyecta sobre la superficie superior de la cabina, de manera que también interseque con la curva obtenida en el primer paso (la línea amarilla de la figura 2.9). Finalmente, solo resta recortar las curvas para que adopten el contorno de la bañera.

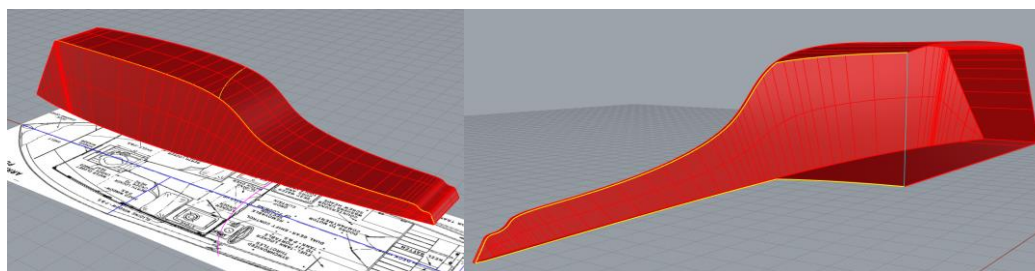


Figura 2.10 Contorno de la bañera II. Fuente: Propia

En la figura 2.10 se advierte que la nueva curva amarilla es fruto de la proyección de la curva magenta dibujada en el plano de cubierta. En la imagen de la derecha se puede ver el diseño de la cabina en un estado muy avanzado, en la que todavía queda crear una superficie que cierre

el volumen de la cabina y también modele la forma final de la bañera. Para efectuar el cierre se debe trazar una línea que una los dos vértices centrales de la cabina (línea azul de la figura 2.10). Después se ejecuta el comando de “*Barrido por 2 carriles*”, operación que sirve para generar la superficie partiendo de sus bordes (resaltados en amarillo) y de sus secciones transversales (la línea azul dibujada anteriormente), pudiéndose considerar como tal cualquier punto, en este caso en el que finalizan los dos bordes destacados en amarillo. El resultado de esta acción es el que se aprecia en la figura 2.11, donde la nueva superficie está resaltada en color naranja.

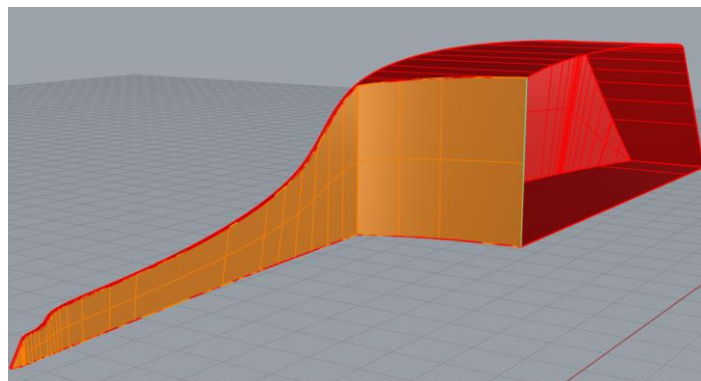









Figura 2.11 Cierre de la cabina. Fuente: Propia


Para poner punto y final al apartado relacionado con la cabina, se estima oportuno añadir las ventanas para proporcionar cierto realismo a la embarcación. Lo que se hace es calcar en la vista de perfil el contorno de las ventanas y luego proyectarlas en la superficie de la cabina. Seguidamente, se aplica la operación “*Tubería*”, que extruye una sección circular de radio determinado a lo largo del carril seleccionado, es decir la curva obtenida de la proyección de la ventana.

Como ya es habitual, se detallan las operaciones utilizadas para el modelado final de la cabina en la tabla 2.12:

COMANDO	LOCALIZACIÓN	FINALIDAD
<b>DEFASAR SUPERFICIE</b>	Superficie > Desfasar superficie 	Generar una superficie equidistante a la parte lateral de cabina que interseque con el cuerpo de la misma.

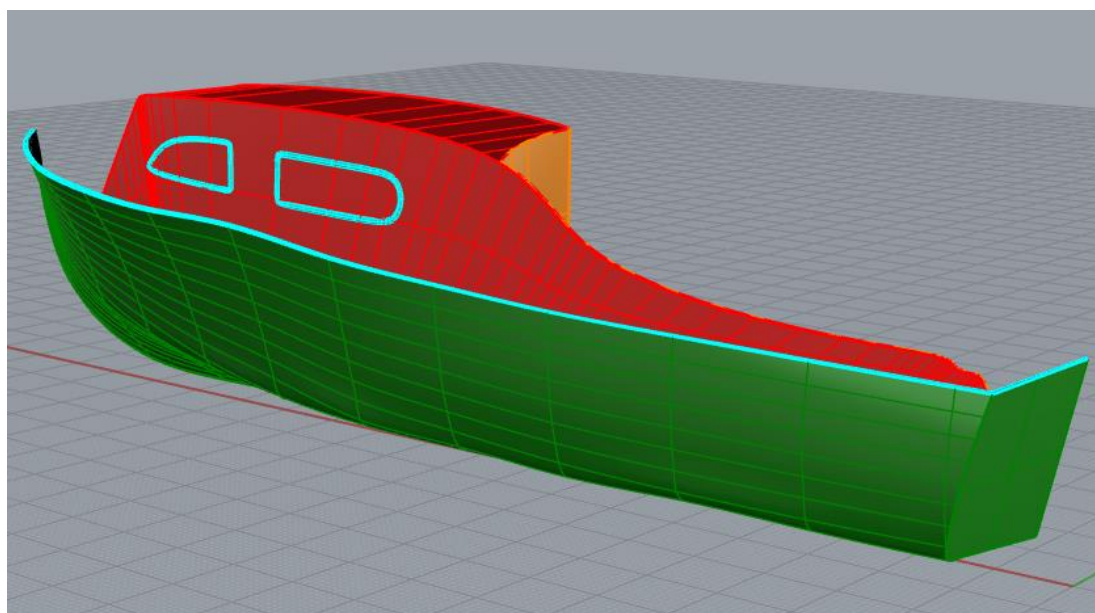
<b>MOVER</b>	Transformar > Mover 	Desplazar hacia arriba la superficie desfasada hasta que interseque la cabina.
<b>INTERSECCIÓN DE DOS CONJUNTOS</b>	Curva > Curva desde objeto > Intersección de dos conjuntos	Generar una nueva curva a partir de la intersección entre la superficie desfasada y el cuerpo de la cabina.
<b>CURVA DE PUNTOS DE CONTROL</b>	Curvas > Curva desde puntos de control 	Calcar el borde delantero de la bañera.
<b>PROYECTAR</b>	Curvas > Proyectar 	Proyectar el borde delantero de la bañera sobre la superficie superior de la cabina.
<b>RECORTAR</b>	Escribir “Recortar” en la barra de comandos.	Recortar las curvas resultantes de la intersección y la proyección hasta obtener el borde superior de la cabina.
<b>UNIR</b>	Estándar > Unir 	Unir las dos curvas después de los recortes pertinentes. Facilita el uso del programa.
<b>POLILÍNEA</b>	Estándar > Polilínea 	Unir los dos vértices libres de la cabina. Esta línea se emplea como sección transversal en el “Barrido por 2 carriles”.
<b>BARRIDO POR 2 CARRILES</b>	Superficies > Barrido por 2 carriles 	Generar la superficie de cierre de la cabina, resaltada en color naranja en la figura 2.11.



<b>TUBERÍA</b>	Sólidos > Tubería 	Crear los contornos de las ventanas.
----------------	---	--------------------------------------

*Tabla 2.12 Comandos empleados para la construcción de la cabina II. Fuente: Propia*

El resultado de todas las operaciones ejecutadas hasta el momento es el que se observa en la figura 2.12. En ella aparecen todos los elementos modelados: el casco, la cabina y las ventanas.



*Figura 2.12 Modelaje de la motora. Fuente: Propia*

### 2.3 MODELADO DEL PANEL DE CONTROL

El presente apartado tiene como propósito abandonar las formas del casco y adentrarse en el diseño de los elementos que hacen posible una buena gobernabilidad de la motora. El objetivo principal es construir el soporte/salpicadero en el cual se acoplan accesorios importantes como el timón y toda clase de indicadores. Es importante mencionar que todas las formas de este apartado son totalmente libres, es decir, no se ha empleado ningún tipo de información proporcionada por los planos.

Para dar comienzo a la construcción del salpicadero se dibujan dos elipsoides concéntricos de tamaños semejantes, a gusto del constructor. Mencionar que las medidas de todos los cuerpos

son aleatorias, únicamente se debe trabajar con proporcionalidad ya que después se escalarán todos los objetos para que se adapten al tamaño de la motora.

Volviendo a los elipsoides, lo que se pretende con ellos es reproducir la parte superior del salpicadero que protege los indicadores situados en el panel de control. Para lograrlo se efectúan dos cortes. El primero permite eliminar las mitades inferiores de ambos cuerpos. Por otro lado, el segundo corte es fruto de una curva trazada desde la vista de planta tal y como se indica en la figura 2.13.

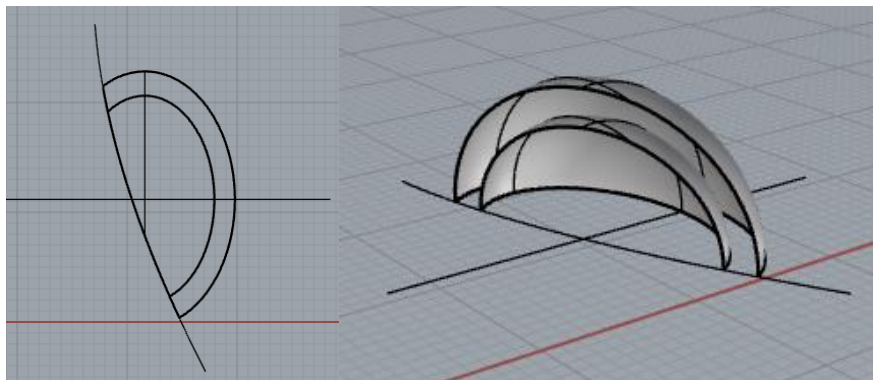


Figura 2.13 Modelado del salpicadero. Fuente: Propia

A continuación, se tiene que construir el cuerpo sobre el cual se soporte el salpicadero. Aprovechando los elipsoides dibujados, se estima oportuno extruir sus bordes inferiores hasta una distancia proporcional al tamaño de los elipsoides. Justo después, las superficies extruidas se deben unir con sus respectivos elipsoides para trabar exclusivamente con dos superficies.

Al igual que se hizo en la unión de las dos caras del casco, ahora también se requiere crear una superficie de transición que conecte los bordes del salpicadero mediante el comando “Mezclar superficies”. De este modo, ajustando adecuadamente los parámetros asociados a esta operación se logran unos mejores acabados de los objetos.

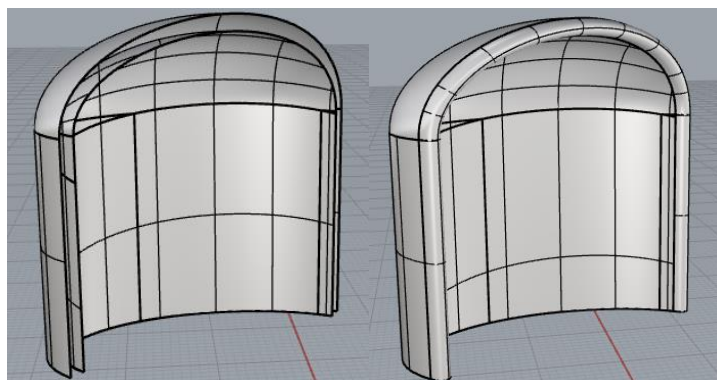


Figura 2.14 Extrusión y acabados del salpicadero. Fuente: Propia

Completados los bordes, se crea el cuerpo del salpicadero. Se dibuja el contorno a la altura inferior del salpicadero, para posteriormente extruirlo hacia arriba hasta la altura deseada. Seguidamente, desde la vista de perfil se traza una línea recta con cierta inclinación y también se extruye. El plano generado es donde se ubicarán todos los elementos de control de la embarcación. Finalmente, solo se deben realizar los cortes necesarios hasta alcanzar un resultado semejante al de la figura 2.15.

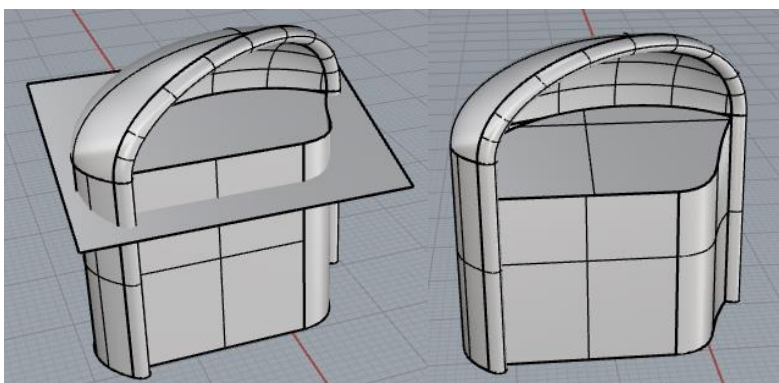


Figura 2.15 Finalización del salpicadero. Fuente: Propia

La tabla 2.13 recopila las operaciones necesarias para la construcción del salpicadero de la motora:

COMANDO	LOCALIZACIÓN	FINALIDAD
ELIPSOIDE	Sólidos > Elipsoide 	Crear la parte superior del salpicadero.
CURVA DE PUNTOS DE CONTROL	Curvas > Curva desde puntos de control 	Trazar el contorno del salpicadero desde la vista de planta.
RECORTAR	Escribir "Recortar" en la barra de comandos.	Modelar la parte superior del salpicadero. También permite modificar la superficie de panel de control.
EXTRUSIÓN	Sólido > Extrusión de curva plana > Recta	Crear el soporte del salpicadero a partir de los



		bordes del elipsoide. También se emplea para crear el plano base que da pie al panel de control.
<b>MEZCLAR SUPERFICIES</b>	Superficie > Mezclar superficie 	Unir los bordes de salpicadero y su soporte mediante una superficie de transición.
<b>UNIR</b>	Estándar > Unir 	Ensamblar las superficies conectadas para facilitar el empleo del programa.
<b>POLILÍNEA</b>	Estándar > Polilínea 	Dibujar la línea que tras ser extruida genera el plano del panel de control.

Tabla 2.13 Comandos empleados para la construcción del salpicadero. Fuente: Propia

Para completar el salpicadero se le debe añadir una serie de accesorios que permitan obtener información a tiempo real de la motora. Para disfrutar de una navegabilidad confortable se han insertado los siguientes indicadores:

- Velocímetro [kn]
- Sonda [m]
- Posición del timón
- Cantidad de combustible
- Estado de las baterías [V]
- Temperatura del refrigerante [°C]
- Presión del turbo [bar]

El diseño de los indicadores es bastante simple, partiendo de que todos tienen una base común: el contorno y la aguja. El primero se realiza dibujando su sección transversal, para que posteriormente se revolucione alrededor de un eje y se obtenga el sólido. En cuanto a la aguja, se diseña libremente mediante el comando de “Curvas de puntos de control”.

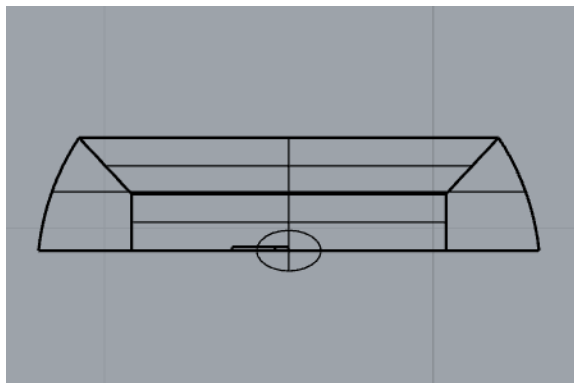


Figura 2.16 Sección transversal del indicador. Fuente: Propia

Dibujados los elementos comunes de todos los indicadores se pasa a su personalización dependiendo de la función a la que estén destinados. Seguidamente se expone el caso del indicador de carga de las baterías, pero el mecanismo es el mismo para todos ellos. Para crear las líneas que especifican el nivel de las baterías es suficiente con crear solo una, el resto son consecuencia de un comando muy interesante denominado *“Matriz polar”*. Su aplicación provoca que se generen las copias deseadas del objeto seleccionado alrededor de un eje repartidas de manera uniforme. Por lo tanto, se concluye que su ejecución puede implicar un ahorro de tiempo considerable por parte del usuario.

Referente a la inserción de texto, el comando pertinente permite escribir todos los caracteres necesarios y ubicarlos en cualquier punto del espacio. Por otro lado, los símbolos como por ejemplo la batería o el termómetro son calcos de imágenes obtenidas en la red. Antes de concluir con los indicadores, mencionar que todos sus componentes se deben agrupar para trabajar con un único objeto y evitar así que éstos se pierdan. Finalmente, se han de colocar los indicadores sobre la superficie del panel de control. Su ubicación no se hace mediante uso de la operación *“Mover”*, sino que se aplica el comando *“Orientar en superficie”*, la cual facilita que un objeto se adapte a cualquier superficie, independientemente de si es plana u oblicua.

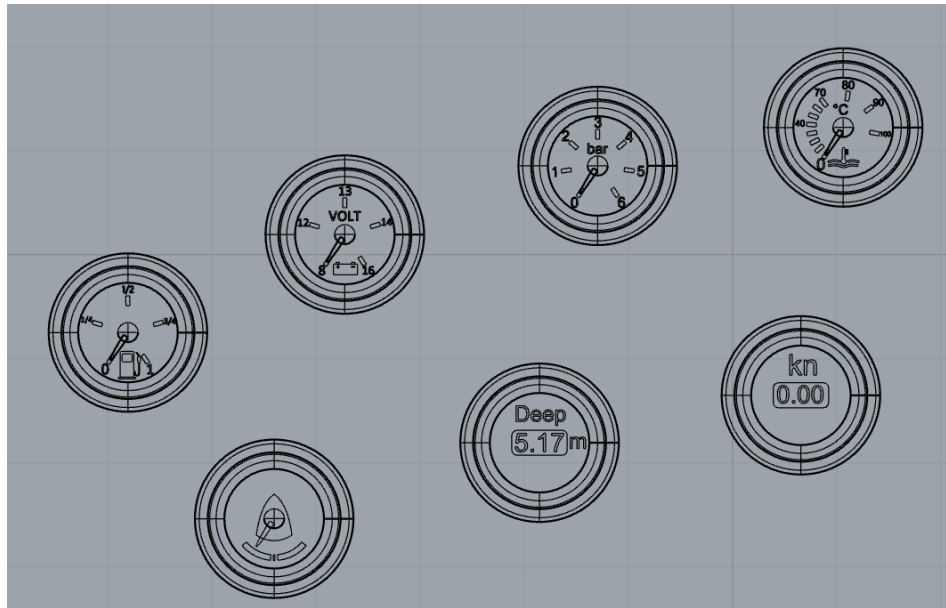






Figura 2.17 Indicador del panel de control. Fuente: Propia

Seguidamente, en la tabla 2.14 se exponen las operaciones efectuadas para el diseño de los indicadores:

COMANDO	LOCALIZACIÓN	FINALIDAD
<b>POLILÍNEA</b>	Estándar > Polilínea 	Dibujar la sección transversal de los indicadores y su eje de revolución.
<b>REVOLUCIÓN</b>	Superficies > Revolución 	Revolucionar la sección transversal y obtener el contorno del indicador.
<b>CURVA DE PUNTOS DE CONTROL</b>	Curvas > Curva desde puntos de control 	Trazar la forma de la aguja. También se emplea para calcar los símbolos de los indicadores (termómetro, posición del timón).
<b>ELIPSOIDE</b>	Sólidos > Elipsoide 	Crear el soporte central de la aguja.




<b>MATRIZ POLAR</b>	Transformar > Cascada de matrices > Matriz polar 	Realizar copias alrededor de un eje de las líneas que indican el estado de las baterías.
<b>OBJETO DE TEXTO</b>	Estándar > Objeto de texto 	Introducir todo los caracteres de los indicadores.
<b>AGRUPAR OBJETOS</b>	Estándar > Agrupar objetos 	Juntar todos los elementos conformando un único objeto.
<b>ORIENTAR EN SUPERFICIE</b>	Transformar > Orientar > En superficie	Colocar adecuadamente los indicadores sobre la superficie del panel de control.

Tabla 2.14 Comandos empleados para la construcción de los indicadores. Fuente: Propia

Otro accesorio imprescindible que debe albergar el panel de control es el mando a distancia. Al tratarse de un objeto simétrico tan solo se ha de dibujar ha diseñado la mitad del mismo. Para su construcción se parte de la vista de perfil, donde se dibujan dos circunferencias de tamaño semejante las cuales se conectan mediante arcos tangentes tal y como se muestra en la figura 2.18. Después se recortan las curvas sobrantes y se procede a extruir ligeramente el perfil dibujado para obtener un sólido.

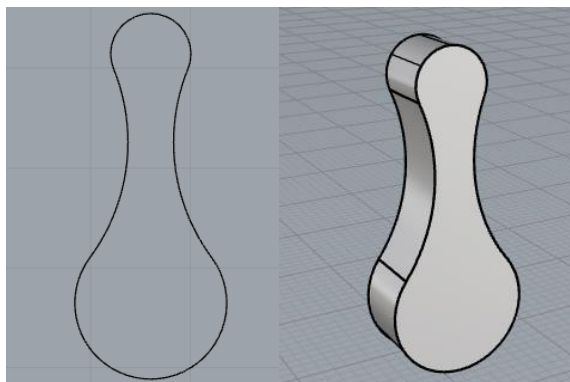


Figura 2. 18 Perfil del mando a distancia. Fuente: Propia

A continuación, se trazan dos circunferencias concéntricas en cada extremo del mando. El objetivo es que mediante su extrusión se generen dos ejes. El inferior que actuará como centro de rotación y el superior será el punto de accionamiento del mando. El eje inferior está ensamblado con el soporte del mando, cuyas formas son francamente sencillas. Se traza una circunferencia del mismo modo que se ha hecho en el perfil del mando, pero en esta ocasión se le dibujan dos líneas rectas tangentes en lugar de arcos. Acto seguido, se unen los extremos de las líneas dibujadas. Al extruir el perfil se crea la base del mando y solo resta aplicar las simetrías pertinentes y agrupar los elementos para la finalización de todo el conjunto del mando a distancia.

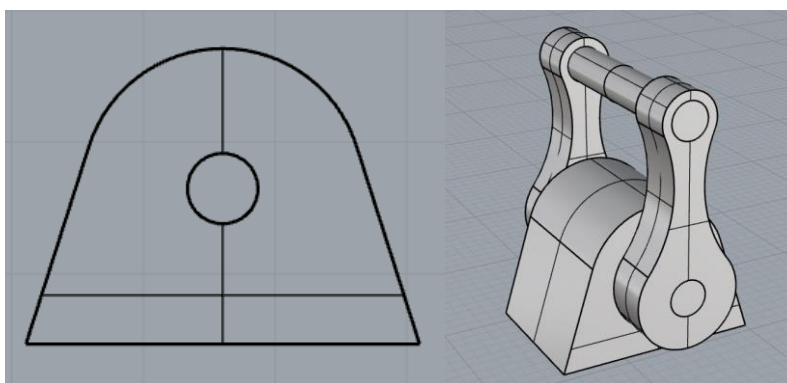



Figura 2.19 Mando a distancia de la motora. Fuente: Propia

Como ya se hizo con los indicadores, al finalizar su construcción se coloca sobre el panel de control haciendo uso de la operación “Orientar en superficie”. Todos los comandos necesarios para esta etapa se desarrollan en la tabla 2.15:

COMANDO	LOCALIZACIÓN	FINALIDAD
<b>CÍRCULO</b>	Estándar > Círculo desde centro y radio 	Dibujar los extremos del mando a distancia. También se emplea para los ejes y la base de mando.
<b>ARCO</b>	Estándar > Arco > Arco tangente a curvas 	Trazar los arcos tangentes que conectan las circunferencias situadas a los extremos del mando.
<b>POLILÍNEA</b>	Estándar > Polilínea 	Completar el perfil del soporte del mando.


<b>EXTRUSIÓN</b>	Sólido > Extrusión de curva plana > Recta	Dar volumen a los ejes, el mando y su soporte.
<b>AGRUPAR OBJETOS</b>	Estándar > Agrupar objetos 	Juntar todos los elementos diseñados en un único objeto.
<b>ORIENTAR EN SUPERFICIE</b>	Transformar > Orientar > En superficie	Colocar adecuadamente el mando sobre la superficie del panel de control.

Tabla 2.15 Comandos empleados para la construcción del mando a distancia. Fuente: Propia

El último objeto construido para el manejo de la motora es la rueda de timón. Dicho elemento es producto de calcar las formas de una imagen extraída en la red. Su construcción se inicia dibujando dos círculos concéntricos de radios similares, formando una superficie en forma de anillo. En el interior del círculo de menor diámetro se dibuja una chaveta en la cual se acople el eje que permite el giro de la rueda. Seguidamente, se extruyen las superficies para obtener un sólido. El siguiente paso es dibujar las asas y los radios del timón. Al estar repartidos uniformemente alrededor del eje central es suficiente con dibujar un elemento en cada caso y posteriormente aplicar el comando “Matriz polar”. El asa y el radio del timón se generan mediante la revolución de su sección transversal, como ya se hizo en el caso de los indicadores. Una vez agrupados los objetos se puede dar por finalizada la rueda de timón.

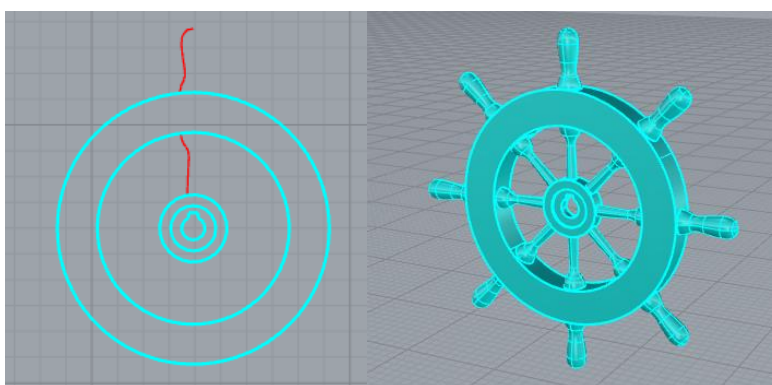


Figura 2.20 Diseño de la rueda de timón. Fuente: Propia

La imagen de la izquierda muestra el calco de los perfiles del asa y el radio del timón. En la parte derecha se observa el resultado de revolucionar los perfiles y de realizar las copias pertinentes. A modo de breve resumen, estas son las acciones aplicadas:

COMANDO	LOCALIZACIÓN	FINALIDAD
<b>CÍRCULO</b>	Estándar > Círculo desde centro y radio 	Diseñar el anillo central de la rueda de timón.
<b>POLILÍNEA</b>	Estándar > Polilínea 	Dibujar el chavetero donde acoplar el eje del timón.
<b>EXTRUSIÓN</b>	Sólido > Extrusión de curva plana > Recta	Crear la parte central del timón (imagen izquierda de la figura 2.20)
<b>CURVA DE PUNTOS DE CONTROL</b>	Curvas > Curva desde puntos de control 	Calcar los perfiles del radio y la asa de la rueda de timón.
<b>REVOLUCIÓN</b>	Superficies > Revolución 	Revolucionar la sección del asa y el radio.
<b>MATRIZ POLAR</b>	Transformar > Cascada de matrices > Matriz polar 	Generar las copias del asa y el radio alrededor del anillo central.
<b>AGRUPAR OBJETOS</b>	Estándar > Agrupar objetos 	Juntar todos los elementos diseñados en un único objeto.

Tabla 2.16 Comandos empleados para la construcción de la rueda de timón. Fuente: Propia

Ensamblados todos los objetos, se puede dar por terminado el bloque relacionado con la gobernabilidad de la embarcación. El resultado es el que se muestra en la figura 2.21:

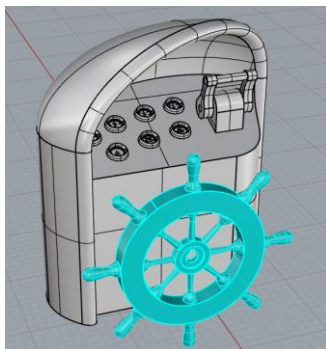


Figura 2.21 Elementos de gobierno de la motora. Fuente: Propia

## 2.4 MODELADO DE LOS DETALLES Y RENDERIZADO FINAL DE LA MOTORA

El último punto relacionado con el diseño de la motora consiste en añadir todos los elementos que se consideren necesarios para mejorar su estética. En este caso se ha optado por implementar el pasamanos, los asientos, una pequeña asta en popa y un deflector de viento ubicado en la parte superior de la cabina.

Para la creación de estos objetos no se ha hecho uso de ningún comando que no se haya visto hasta el momento. Por lo que se insta al lector que trate de confeccionar sus propios accesorios e incorporarlos en la embarcación.

Del mismo modo, el renderizado de la motora es totalmente libre. Para poder realizarlo, es imprescindible cambiar el estilo de visualización a “Renderizado” (ubicado en el menú desplegable de cada vista). Posteriormente se ha de asignar el material y el color deseado a cada uno de los elementos. Resumiendo:

COMANDO	LOCALIZACIÓN	FINALIDAD
RENDERIZAR	Propiedades  Pr > Material 	Establecer el material y el color del elemento seleccionado.

Tabla 2.17 Comandos empleados para la renderización de la motora. Fuente: Propia



Respetando estos pasos, la motora *Caballero* presenta el siguiente aspecto previo al renderizado:

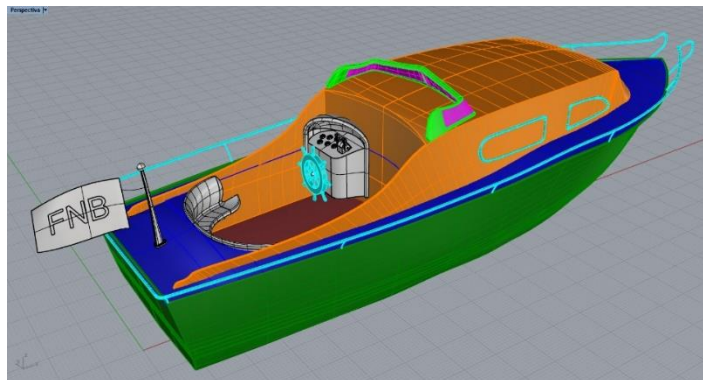


Figura 2.22 Motora Caballero sin renderizar. Fuente: Propia

Y este otro una vez renderizada:



Figura 2.23 Motora Caballero renderizada. Fuente: Propia

Con la figura 2.23 se da por concluido el bloque relacionado con el diseño de la embarcación. A simple vista la motora dibujada se asemeja bastante a la proyectada en los planos de formas. No obstante, es recomendable realizar una comprobación de los parámetros principales mediante el programa *Maxsurf*. El en el Anexo I se encuentra el plano de formas de la motora modelada.

Por otro lado, con la finalización de este apartado también se espera que la pequeña guía elaborada a partir de las tablas de comandos pueda servir de base a usuarios inexpertos para iniciarse en el dibujo de embarcaciones mediante el uso de *Rhinoceros*.

## 2.5 ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS DEL CASCO MEDIANTE MAXSURF

De todas las etapas de modelado estudiadas hasta el momento, la que cobra mayor relevancia es la referente al casco de la embarcación. Es por este motivo que el diseño llevado a cabo en el apartado 5.1 se somete a una revisión para corroborar que se ajusta a los criterios de construcción expuestos en la tabla 2.2. La comprobación de dichos parámetros es posible gracias a la aplicación de software dedicado a la arquitectura naval, concretamente el programa *Maxsurf*. Se trata de una herramienta especializada en el diseño de cascos, análisis de estabilidad y predicción de la resistencia al avance entre otras muchas funcionalidades. No obstante, para su correcta ejecución es necesario que el trabajo previo realizado en *Rhinoceros* cumpla ciertos requisitos. Seguidamente se detallan los pasos imprescindibles para la comprobación de los parámetros del casco.

Antes de nada, es interesante crear un archivo nuevo en *Rhinoceros* que únicamente contenga el casco de la motora. En segundo lugar, la ubicación de las vistas no puede ser aleatoria, sino que se debe colocar el casco de modo que la proyección longitudinal, transversal y la planta se encuentren en la vista frontal, derecha y superior respectivamente tal y como se muestra en la figura 2.24.

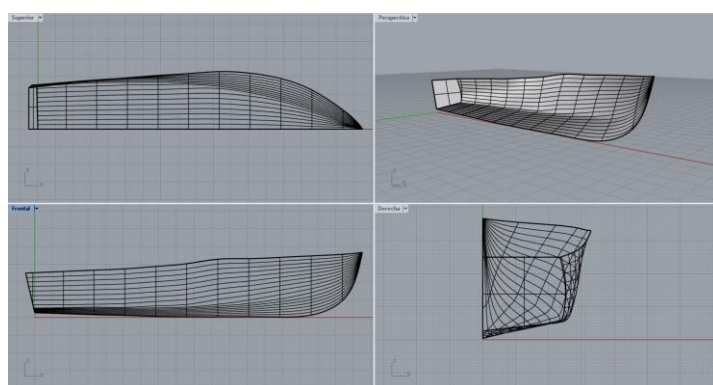


Figura 2.24 Colocación de las vistas en Rhinoceros. Fuente: Propia

Otro punto a tener en cuenta es la determinación y localización del punto que sirva de referencia. Aprovechando los planos, se estima oportuno que el origen sea consecuencia de la intersección entre la recta vertical que pasa por el extremo inferior del espejo de popa y la recta horizontal que pasa por el punto más bajo de la embarcación. En la figura 2.25 se puede apreciar dicho origen en la intersección entre la línea verde y la roja, por lo tanto, se ha hecho coincidir con la coordenada  $O = (0,0,0)$ . Es evidente que un correcto acomodo de la embarcación en *Rhinoceros* supone un gran ahorro de tiempo a la hora de empezar a trabajar con *Maxsurf*.

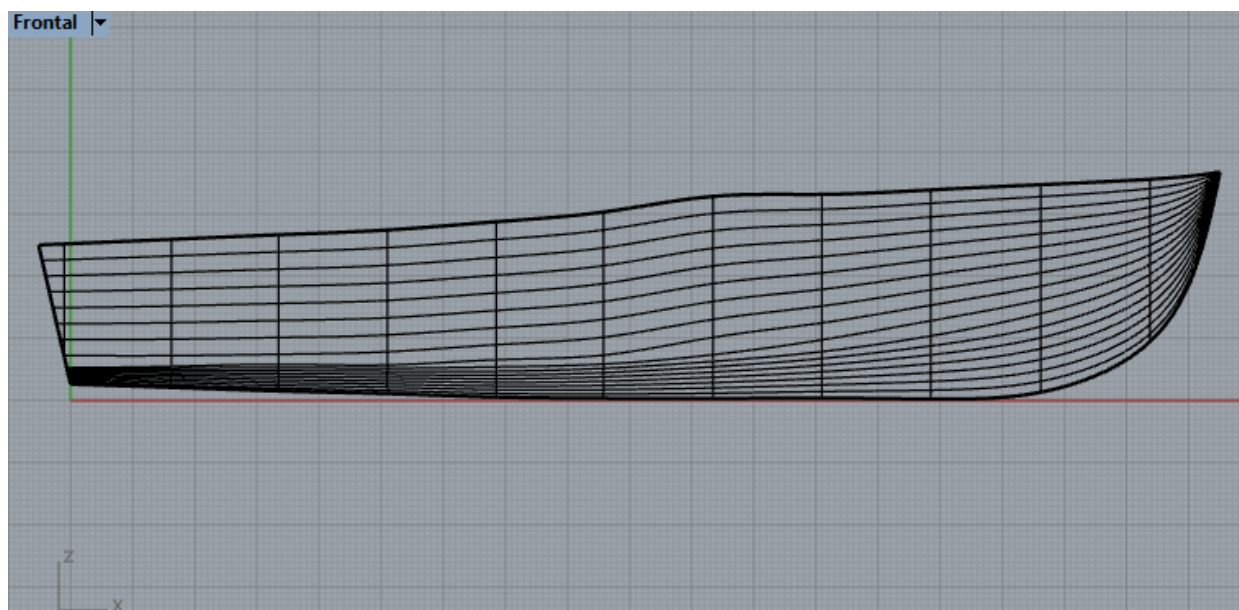


Figura 2.25 Determinación del origen de la embarcación. Fuente: Propia

El tercer paso consiste en guardar el archivo en un formato que sea compatible con *Maxsurf*. El empleado con mayor asiduidad es el *Modelo 3D de Rhino 6 (\*.3dm)*, dado que es el formato predeterminado por el mismo programa. No obstante, en caso que éste resulte defectuoso a la hora de ejecutarlo en *Maxsurf*, una buena alternativa es guardar el fichero en formato *IGES (\*.igs)*, opción válida en el desarrollo de este trabajo.

A continuación, el archivo ya está listo para ser importado a *Maxsurf*. Cuando se abre el fichero el programa demanda que se seleccionen las unidades de trabajo y la dirección de los tres ejes cartesianos. Conviene resaltar que las unidades seleccionadas deben concordar con las empleadas durante el modelado en *Rhinoceros*, ya que sino los resultados que se obtengan serán totalmente erróneos.

Abierto el fichero, el siguiente paso es realizar la simetría del casco si no se ha hecho previamente en *Rhinoceros*. El paso es sencillo, simplemente se debe abrir una de las pestañas situadas en el borde inferior del programa referente y que hace referencia a “*Superficies*” para posteriormente aplicar la simetría.

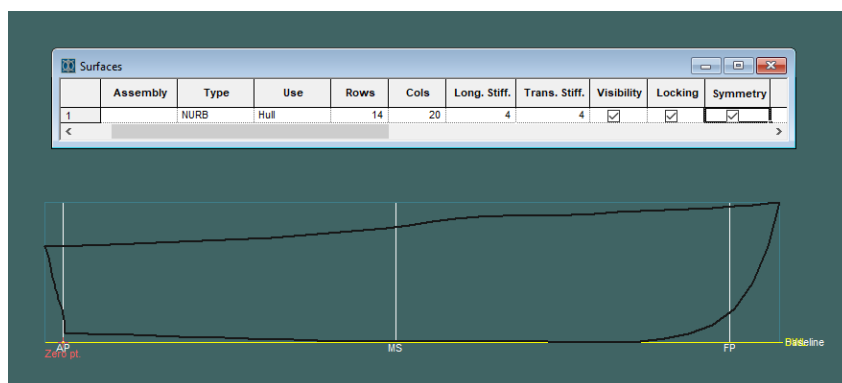


Figura 2.26 Generación de la simetría del casco en Maxsurf. Fuente: Propia

Alcanzado este punto, ya casi se pueden calcular los parámetros de diseño. Todavía resta ajustar algunas referencias del casco, concretamente el calado de la embarcación. Para su especificación se debe desplegar el menú “Data” y seleccionar la opción “Frame of reference”. Una vez abierto, permite modificar los puntos de referencia de la embarcación, así como el calado de la misma. Se introduce el calado indicado por el constructor, exactamente 0,23 m.

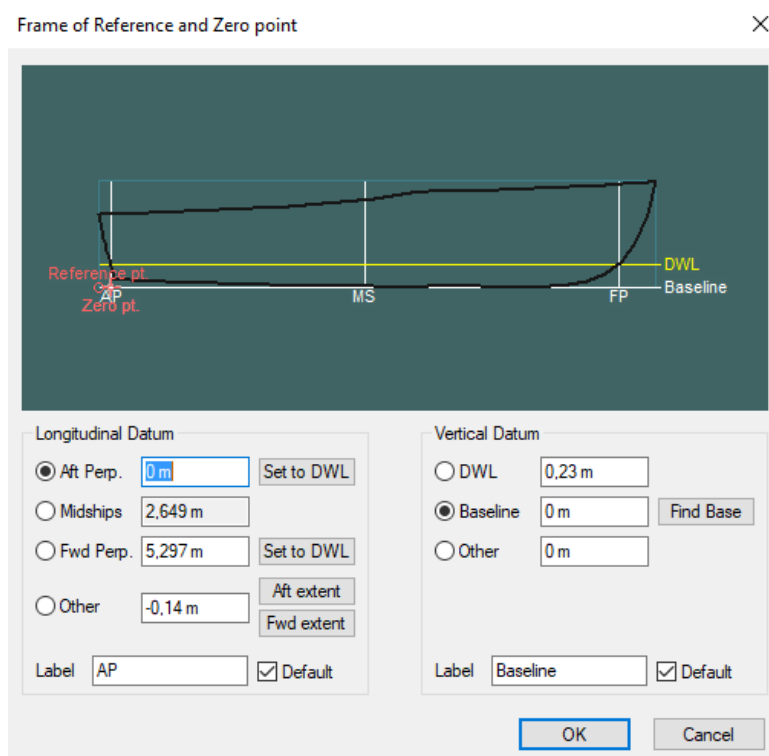


Figura 2.27 Inserción de las referencias y calado de la motora. Fuente: Propia

Después de especificar las referencias y el calado de la motora el software ya es capaz de obtener los primeros resultados. El objetivo es que estos valores se asemejen lo máximo posible a los indicados por el constructor. Para comprobarlo se vuelve a desplegar el menú “Data”, pero

en esta ocasión se escoge la opción “*Calculate Hydrostatics*”. Los resultados se aparecen reflejados en la figura 2.28:

Hydrostatics at DWL

	Measurement	Value	Units
1	Displacement	0,8303	t
2	Volume (displaced)	0,810	m³
3	Draft Amidships	0,230	m
4	Immersed depth	0,229	m
5	WL Length	5,287	m
6	Beam max extents o	1,634	m
7	Wetted Area	7,169	m²
8	Max sect. area	0,222	m²
9	Waterpl. Area	6,622	m²
10	Prismatic coeff. (Cp)	0,689	
11	Block coeff. (Cb)	0,409	
12	Max Sect. area coeff	0,618	
13	Waterpl. area coeff.	0,766	

Figura 2.28 Parámetros obtenidos a partir de Maxsurf. Fuente: Propia

Para realizar una mejor comparativa la tabla 2.18 recopila los valores extraídos de ambas fuentes:

PARÁMETRO	CONSTRUCTOR	MAXSURF	ERROR ABSOLUTO	ERROR RELATIVO (%)
Eslora flotación LWL (m)	5,33	5,287	0,043	0,807
Manga (m)	1,96	1,634	0,326	16,633
Calado (m)	0,23	0,23	0	0
Desplazamiento (kg)	793,78	830,3	36,52	4,601
Coefficiente de bloque	0,428	0,409	0,019	4,439
Coefficiente prismático	0,723	0,689	0,034	4,703
Superficie mojada (m²)	7,3	7,169	0,131	1,795
Área del pano de flotación (m²)	6,55	6,62	0,07	1,069

Tabla 2.18 Comparativa de los parámetros de la motora. Fuente: Propia

*La tabla 2.18 refleja que las formas de la motora modelada son similares a las que establece el constructor. Así lo indica el error relativo, con valores muy bajos que no llegan a sobrepasar el 5% a excepción de la manga. Una de las causas por la que el error relativo de la manga puede verse incrementado es por no haber ajustado con la precisión necesaria las líneas de agua y las cuadernas o simplemente una acumulación de diferentes errores. No obstante, se puede afirmar que los resultados obtenidos son los deseados y que por lo tanto la motora no difiere en demasía con la original.*

## CAPÍTULO 3 EVALUACIÓN DE LA MOTORA

El último bloque del proyecto pretende valorar algunos de los aspectos más importantes de la embarcación diseñada. Para el desarrollo de estos puntos ha sido frecuente recurrir al uso de normativa que garantice unos mínimos de calidad y seguridad. Entre los parámetros más importantes a valorar se encuentran: el escantillonado, la determinación de la resistencia al avance y el equipo propulsor, la disposición general y por último, la estabilidad de la motora.

### 1. DETERMINACIÓN DEL ESCANTILLONADO, ISO 12215

La fase de determinación del escantillonado es una de las que presenta mayor relevancia dentro del proceso del diseño. Estimar el escantillonado adecuadamente asegura la integridad y la estanqueidad de la embarcación. Dado que se trata de un parámetro de vital importancia para la seguridad de los pasajeros y el respeto del medio ambiente, la *Organización Internacional de Normalización (ISO)* elaboró una normativa que especifica las directrices a tener en cuenta para el cálculo del escantillonado.

Concretamente, todas estas indicaciones se encuentran recogidas en la norma *UNE-EN ISO 12215:2008 – Pequeñas embarcaciones. Construcción de cascos y escantillones. Parte 5: Presiones de diseño, tensiones de diseño y determinación del escantillón.*

Esta normativa se puede dividir en tres bloques principales:

- 1) Distribución de los paneles. Los refuerzos transversales y longitudinales son determinantes para la ubicación de los paneles dado que delimitan la superficie de los mismos.
- 2) Cálculo de la presión a la que son sometidos los paneles. En esta ocasión, la ubicación y la dimensión de los paneles son los factores principales que modifican el valor de la presión.
- 3) Cálculo del espesor mínimo de cada panel. Determinada la presión del panel, se obtiene el espesor mínimo del mismo dependiendo del material con el que se pretenda realizar el laminado. Finalmente, se debe corroborar que la secuencia de laminado propuesta posee un espesor superior al mínimo establecido por la normativa.

A grandes rasgos, se trata de una normativa conformada por numerosos pasos ya que se precisa calcular una gran cantidad de parámetros para la determinación del escantillonado. Por lo que

se recomienda la elaboración de una hoja de cálculo que determine el espesor final mediante la variación de algunos parámetros iniciales.

A continuación, se encuentran resumidos los pasos efectuados para el cálculo del escantillonado de la motora del proyecto.

### 1.1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN DE LA NORMA

Como ya se ha comentado con anterioridad, esta norma se aplica para el cálculo de presiones y tensiones a las que están expuestos los elementos de una embarcación para posteriormente determinar el escantillonado. No obstante, para poder llevar a cabo su aplicación la embarcación a estudiar debe cumplir los siguientes requisitos:

- $L_H$  Comprendida entre 2,5 y 24 m.
- $V$  No superior a 50 kn en condiciones de plena carga.
- $V$  Superior a  $2,36 \sqrt{L_{WL}}$ .

Recopilando los datos de la motora *Caballero*:

MOTORA CABALLERO	
$L_H$ (m)	5,79
$L_{WL}$ (m)	5,33
$V_{Máx}$ (kn)	27

Tabla 3.1 Datos de la motora *Caballero* para la aplicación de la normativa. Fuente: [www.shipmodell.com](http://www.shipmodell.com)

De la tabla 3.1 se deduce que la normativa es aplicable para la motora estudiada. Cumple con los parámetros relacionados con la eslora y también con los referentes a la velocidad, ya que:

$$2,36 \sqrt{L_{WL}} < V_{Máx} \leq 50 \text{ [kn]} \quad (3.1)$$



## 1.2 DIMENSIONES Y DATOS

Previamente a adentrarse en la realización de los cálculos necesarios para la obtención del escantillonado se han de especificar los parámetros que aparecen en las ecuaciones. Los más relevantes son:

- $L_H$ , eslora del casco, [m].
- $L_{WL}$ , eslora en la flotación, [m].
- $B_C$ , es la manga en el pantoque, medida a  $0,4 L_{WL}$  a proa del extremo de popa, [m].
- $\beta_{0,4}$ , es el semiángulo del diedro del fondo a  $0,4 L_{WL}$  a proa del extremo de popa, debe estar comprendido entre  $10^\circ$  y  $30^\circ$ ,  $[\circ]$ .
- $V$ , es la velocidad máxima en aguas tranquilas declarada por el constructor, [kn].
- $m_{LDC}$ , masa del desplazamiento en carga de la embarcación, [kg].

Mediante la ayuda del software *Rhinoceros* se miden los valores  $B_C$  y  $\beta_{0,4}$  a  $0,4 L_{WL}$  a proa de su extremo de popa tal y como indica la normativa:

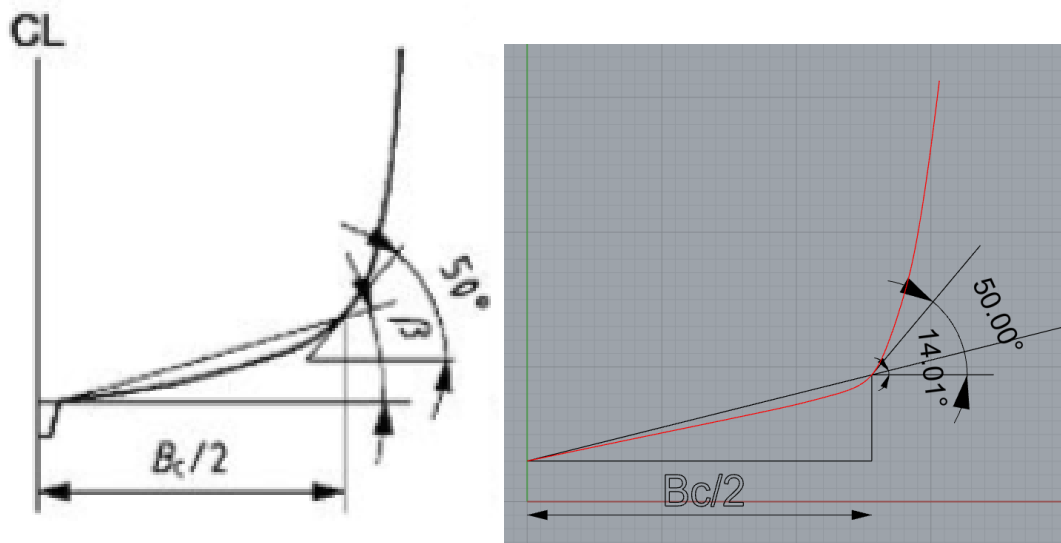


Figura 3.1 Determinación de los parámetros  $B_C$  y  $\beta_{0,4}$ . Fuente: ISO 12215-5:2008

Los valores se recogen en la tabla 3.2:

PARÁMETROS PRINCIPALES DE LA MOTORA CABALLERO	
$L_H$ (m)	5,79
$L_{WL}$ (m)	5,33
$B_c$ (m)	1,56
$\beta_{0,4}$ (°)	14,01
$V$ (kn)	27
$m_{LDC}$ (kg)	793,8

Tabla 3.2 Parámetros principales de la motora Caballero. Fuente: Propia

Para concluir este apartado, la norma también indica que se debe determinar si la embarcación estudiada trabaja en modalidad desplazamiento o planeo. Para ello se fundamenta en la relación establecida por las ecuaciones 3.2 y 3.3:

$$\frac{V}{\sqrt{L_{WL}}} < 5 \text{ Desplazamiento} \quad (3.2)$$

$$\frac{V}{\sqrt{L_{WL}}} \geq 5 \text{ Planeo} \quad (3.3)$$

Para el caso de la motora Caballero, el resultado es siguiente:

$$\frac{27}{\sqrt{5,33}} = 11,69 \quad (3.4)$$

Respetando los criterios especificados por la norma, la motora *Caballero* alcanza el régimen de planeo. No obstante, también es interesante estudiar su comportamiento en modalidad desplazamiento ya que lo adoptará cuando navegue a velocidades inferiores.

### 1.3 DISTRIBUCIÓN DE LOS PANELES

La *ISO 12215-5:2008* establece la existencia de dos tipos distintos de paneles dependiendo de donde se encuentren ubicados. Los paneles pueden ser:

- Paneles de fondo. Se encuentran por debajo de la línea de flotación.
- Paneles de costado. Son los paneles del casco localizados por encima de la línea de flotación.

La distribución de los paneles no es aleatoria. Su ubicación está dictaminada por la posición de los refuerzos transversales y longitudinales del casco. Además, deben respetar unas dimensiones específicas, por lo que suele ser habitual que se cambie la distribución de paneles inicial. En el *Anexo II* se puede apreciar con detalle la distribución aplicada.

*En el caso de este proyecto, la distribución original se ha visto modificada hasta en dos ocasiones. El problema principal residía en las formas de los paneles iniciales. Éstos eran demasiado largos en proporción a su anchura, con lo que se incumplía uno de los criterios establecidos por la normativa. Como solución se optó por acortar el largo de los paneles aprovechando de este modo casi toda la totalidad de las cuadernas. En consecuencia, el número de paneles se ha visto aumentado de forma considerable.*

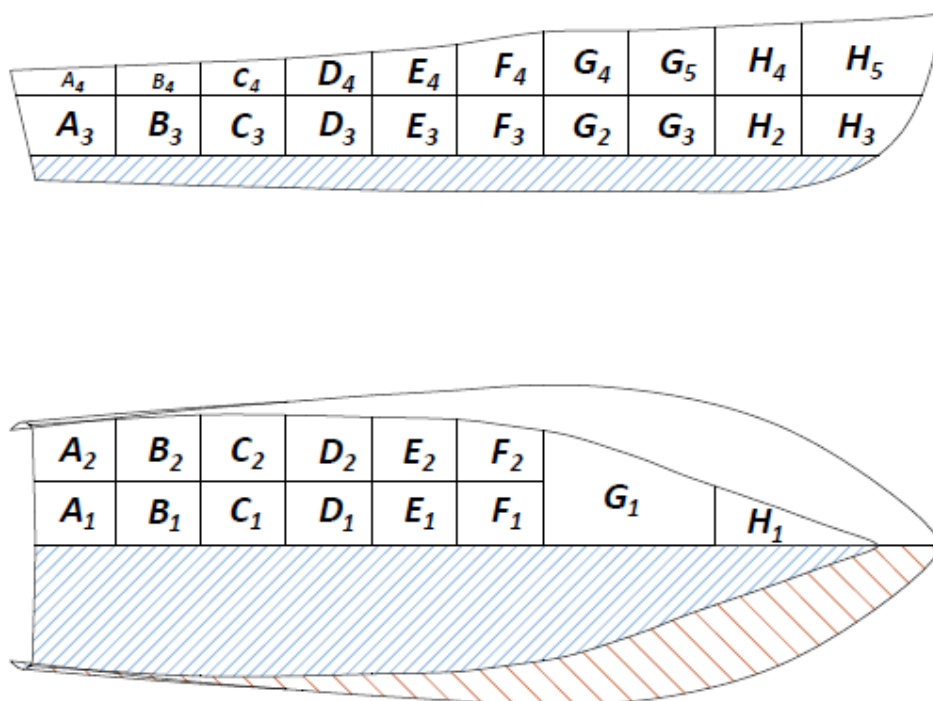


Figura 3.2 Distribución final de los paneles. Fuente: Propia

En la figura 3.2 se muestra como se encuentran ubicados los paneles. En el sentido longitudinal se aprecia que cada cuaderna delimita los paneles, exceptuando la penúltima empezando por la popa. Al mismo tiempo, un refuerzo longitudinal separa los paneles de fondo y de costado.

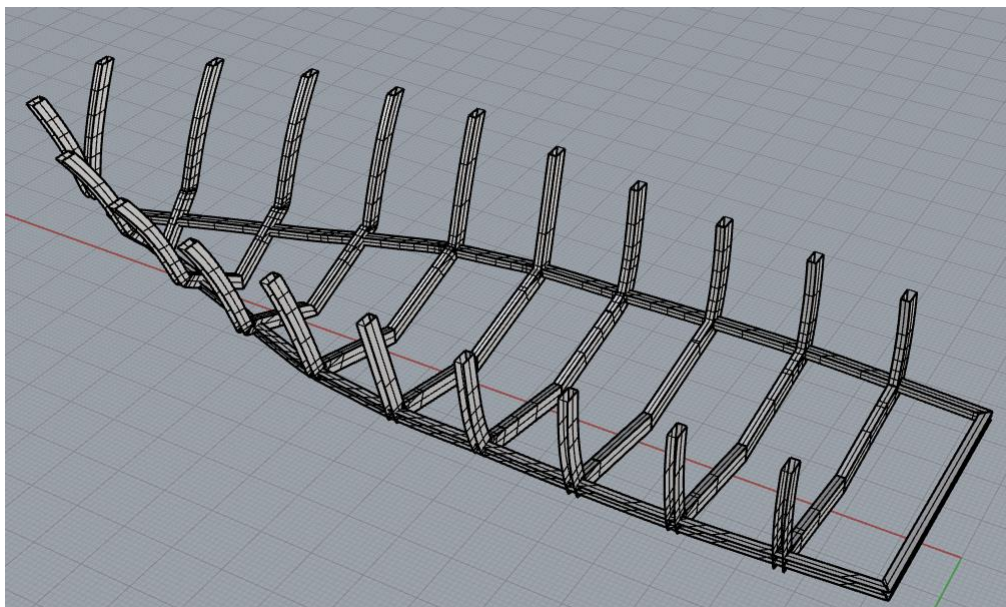


Figura 3.3 Ubicación de las cuadernas y los refuerzos longitudinales. Fuente: Propia

## 1.4 FACTORES DE AJUSTE DE PRESIÓN

Dada por finalizada la distribución de los paneles, el siguiente paso es calcular las presiones producidas en cada punto del casco. Para su obtención se hace uso de una serie de parámetros cuyo cálculo se especifica en los subapartados que conforman este punto.

Todos los valores calculados se encuentran en el *Anexo III*. No obstante, on el fin de facilitar la comprensión de los parámetros se adjunta el estudio de un panel seleccionado de manera aleatoria, el panel A1.

### 1.4.1 FACTOR DE CATEGORÍA DE DISEÑO $k_{DC}$

Tal y como especifica el título, es un factor que depende en su totalidad de la categoría de diseño a la que pertenezca la embarcación. Estos valores se encuentran tabulados:

CAEGORÍA DE DISEÑO	A	B	C	D
$k_{DC}$	1	0,8	0,6	0,4

Tabla 3.3 Valores de  $k_{DC}$  en función de la categoría de diseño. Fuente: ISO 12215-5:2008

La motora *Caballero* pertenece a la categoría de diseño C, por lo que se empleará:

$$k_{DC} = 0,6 \quad (3.5)$$

#### 1.4.2 FACTOR DE CARGA DINÁMICA $n_{CG}$ PARA EMBARCACIONES PLANEADORAS A MOTOR

Es un parámetro que tiene en cuenta la aceleración negativa soportada por la embarcación cuando ésta absorbe el impacto producido por una ola. El cálculo se efectúa a través de la ecuación 3.6 y su resultado se expresa en  $g^{17}$ . Además, indicar que los subíndices *P* y *D* hacen referencia a la modalidad de planeo y desplazamiento respectivamente:

$$n_{CGP} = 0,32 \left( \frac{L_{WL}}{10 \times B_C} + 0,084 \right) \times (50 - \beta_{0.4}) \times \frac{V^2 \times B_C^2}{m_{LDC}} [g] \quad (3.6)$$

En caso de que el valor resultante sea superior a 3 se debe emplear la ecuación 3.7:

$$n_{CGP} = \frac{0,5 \times V}{m_{LDC}^{0,17}} [g] \quad (3.7)$$

En ningún caso el valor de  $n_{CG}$  puede ser superior a 7. Para el cálculo del  $n_{CG}$  de la motora se ha hecho uso de la fórmula 3.7 dado que a través de la expresión 3.6 se obtenía un valor superior a 3. El resultado final es:

$$n_{CGP} = \frac{0,5 \times 27}{793,8^{0,17}} = 4,34 g \quad (3.8)$$

Finalmente, remarcar que cuando la motora trabaja en modalidad desplazamiento presenta un factor de carga dinámica  $n_{CG}$  distinto establecido por la normativa.

$$n_{CGD} = 3 g \quad (3.9)$$

<sup>17</sup> $g$ , unidad de medida de la aceleración. 1 g equivale a 9,18 m/s<sup>2</sup>.

### 1.4.3 FACTOR LONGITUDINAL DE DISTRIBUCIÓN DE PRESIÓN $k_L$

Es un factor que modifica la presión de los paneles en función de su posición longitudinal respecto a la eslora de flotación. Dependiendo de la ubicación del centro de cada panel se aplica una expresión u otra:

$$k_L = \frac{1 - 0,167 \times n_{CG}}{0,6} \frac{X}{L_{WL}} + 0,167 \times n_{CG} \quad \text{Si; } \frac{X}{L_{WL}} \leq 0,6 \quad (3.10)$$

$$k_L = 1 \quad \text{Si; } \frac{X}{L_{WL}} > 0,6 \quad (3.11)$$

Donde  $X$  es la coordenada longitudinal del centro geométrico de cada panel calculada con la ayuda de *Rhinoceros*. Para el caso del panel estudiado la expresión válida es la 3.10:

$$k_{L_P} = \frac{1 - 0,167 \times 4,34}{0,6} \frac{0,28}{5,33} + 0,167 \times 4,34 = 0,74 \quad (3.12)$$

$$k_{L_D} = \frac{1 - 0,167 \times 3}{0,6} \frac{0,28}{5,33} + 0,167 \times 3 = 0,54 \quad (3.13)$$

### 1.4.4 FACTOR DE REDUCCIÓN DE PRESIÓN SEGÚN LA SUPERFICIE $k_{AR}$

Es un parámetro que relaciona la presión de un panel con su superficie. Su determinación depende de si la embarcación trabaja en modalidad de planeo o de desplazamiento. Su valor se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$k_{AR} = \frac{k_R \times 0,1 \times m_{LDC}^{0,15}}{A_D^{0,3}} \quad (3.14)$$

Donde:

- $k_R$ , es el factor estructural y varía en función de la índole de embarcación:

$k_R = 1$ , para los paneles situados en el fondo y en los costados en embarcaciones en modalidad de planeo.

$k_R = 1,5 - 3 \times 10^{-4} \times b$ , para los paneles situados en el fondo y los costados en embarcaciones en modalidad desplazamiento.

- $A_D = (l \times b) \times 10^{-6}$ , [m<sup>2</sup>]. Este valor no puede ser superior a  $2,5 \times b^2 \times 10^{-6}$ .
- $b$ , dimensión menor del panel, [mm].
- $l$ , dimensión mayor del panel [mm].

Es necesario remarcar que la modificación de la distribución de los paneles anteriormente mencionada viene impulsada por el incumplimiento del criterio relacionado con el cálculo del área. Los valores que se obtenían superaban notablemente el máximo permitido, por lo que se consideró oportuno reducir la mayor dimensión de los paneles, sacando el máximo partido a las cuadernas.

Referente al valor de  $k_{AR}$ , para los paneles de una sola capa debe cumplir:

$$0,25 \leq k_{AR} \leq 1 \quad (3.15)$$

Para mayor comodidad, en la tabla 3.4 se adjuntan los valores resultantes de aplicar las ecuaciones anteriores durante el estudio del panel A1:

PANEL A1	
UBICACIÓN	Fondo
$l$ (mm)	508
$b$ (mm)	412,75
$A_D$ (m <sup>2</sup> )	0,209
VALOR LÍMITE $A_D$ (m <sup>2</sup> )	0,425
$k_{RP}$	1
$k_{RD}$	1,37
$k_{ARP}$	0,43
$k_{ARD}$	0,59

Tabla 3.4 Factor de reducción de presión según la superficie  $k_{AR}$  del panel A1. Fuente: Propia

La tabla 3.4 evidencia que los valores obtenidos se encuentran entre los límites establecidos por la ecuación 3.15 y que por lo tanto son válidos.

#### 1.4.5 FACTOR DE REDUCCIÓN DE PRESIÓN $k_z$ EN EL COSTADO

Se trata de un factor exclusivo para los paneles de los costados. Su función es interpolar la presión en los costados partiendo de la presión en la línea de flotación y la presión en el borde superior del costado. Es fruto de la expresión 3.16:

$$k_z = \frac{Z - h}{Z} \quad (3.16)$$

Donde:

- $Z$ , es el francobordo de la embarcación en la ubicación de estudio, [m].
- $h$ , altura del centro del panel respecto a la línea de flotación, [m].

Para el panel A1  $k_z$  equivale a:

$$k_z = \frac{0,54 - 0,17}{0,54} = 0,68 \quad (3.17)$$

#### 1.5 PRESIONES DE DISEÑO

El segundo bloque para el cálculo del escantillonado consiste en cuantificar el valor de las presiones existentes en los paneles del casco. Dado que ya se dispone de todos los factores, únicamente se deben aplicar las directrices establecidas por la normativa prestando especial atención a dos criterios:

- La ubicación de los paneles, es decir si se encuentran en el costado o en el fondo.
- El régimen de trabajo de la embarcación, si adopta la modalidad desplazamiento o planeo.

Todas las presiones calculadas en este bloque para el panel A1 se encuentran tabuladas en el apartado final para poder realizar una mejor lectura de los datos.

##### 1.5.1 PRESIÓN EN LOS FONDOS PARA LAS EMBARCACIONES A MOTOR EN MODALIDAD DESPLAZAMIENTO $P_{BMD}$

La presión en los paneles situados en el fondo de la embarcación cuando adopta el régimen de desplazamiento  $P_{BMD}$  corresponde al valor más alto de las ecuaciones 3.18 y 3.19:



$$P_{BMD} = P_{BMD\ BASE} \times k_{AR_D} \times k_{DC} \times k_{LD} \text{ [kN/m}^2\text{]} \quad (3.18)$$

$$P_{BM\ MÍN.} = 0,45 m_{LDC}^{0,33} + (0,9 \times L_{WL} \times k_{DC}) \text{ [kN/m}^2\text{]} \quad (3.19)$$

Donde  $P_{BMD\ BASE}$  equivale a:

$$P_{BMD\ BASE} = 2,4 m_{LDC}^{0,33} + 20 \text{ [kN/m}^2\text{]} \quad (3.20)$$

### 1.5.2 PRESIÓN EN LOS FONDOS PARA LAS EMBARCACIONES A MOTOR EN MODALIDAD DE PLANEÓ $P_{BMP}$

Cuando la embarcación planea también se debe escoger la presión más alta resultante de las siguientes fórmulas:

$$P_{BMP} = P_{BMP\ BASE} \times k_{AR_P} \times k_{LP} \text{ [kN/m}^2\text{]} \quad (3.21)$$

$$P_{BM\ MÍN.} = 0,45 m_{LDC}^{0,33} + (0,9 \times L_{WL} \times k_{DC}) \text{ [kN/m}^2\text{]} \quad (3.22)$$

Donde  $P_{BMP\ BASE}$  es igual a:

$$P_{BMP\ BASE} = \frac{0,1 \times m_{LDC}}{L_{WL} \times B_C} \times (1 + k_{DC}^{\frac{1}{2}} \times n_{CG_P}) \text{ [kN/m}^2\text{]} \quad (3.23)$$

### 1.5.3 PRESIÓN EN EL COSTADO PARA LAS EMBARCACIONES A MOTOR EN MODALIDAD DESPLAZAMIENTO $P_{SMD}$

La presión ejercida sobre los paneles de los costados en modo desplazamiento equivale al mayor valor resultante de las expresiones 3.24 y 3.25:

$$P_{SMD} = [P_{DM\ BASE} + k_Z \times (P_{BMD\ BASE} - P_{DM\ BASE})] \times k_{AR_D} \times k_{DC} \times k_{LD} \text{ [kN/m}^2\text{]} \quad (3.24)$$

$$P_{SM \text{ MÍN.}} = 0,9 L_{WL} \times k_{DC} \text{ [kN/m}^2\text{]} \quad (3.25)$$

Donde  $P_{DM \text{ BASE}}$  se calcula mediante:

$$P_{DM \text{ BASE}} = 0,35 \times L_{WL} + 14,6 \text{ [kN/m}^2\text{]} \quad (3.26)$$

#### 1.5.4 PRESIÓN EN EL COSTADO PARA LAS EMBARCACIONES A MOTOR EN MODALIDAD DE PLANEÓ $P_{SMP}$ :

Para los panes ubicados por encima de la línea de flotación en régimen de planeo se ha de escoger el valor más elevado fruto de las siguientes ecuaciones:

$$P_{SMP} = [P_{DM \text{ BASE}} + k_Z \times (0,25 \times P_{BMP \text{ BASE}} - P_{DM \text{ BASE}})] \times k_{AR_P} \times k_{DC} \times k_{LP} \text{ [kN/m}^2\text{]} \quad (3.27)$$

$$P_{SM \text{ MÍN.}} = 0,9 L_{WL} \times k_{DC} \text{ [kN/m}^2\text{]} \quad (3.28)$$

#### 1.6 ESCANTILLONADO MÍNIMO REQUERIDO

El escantillonado propuesto para el casco de la embarcación ha de ser superior al mínimo que establece la *ISO 12215-5:2008*. Para poder llevar a cabo su determinación, previamente es necesario calcular alguna de las propiedades mecánicas de los paneles. Con este propósito, en el *Anexo C* de la normativa constan diferentes métodos de evaluación de las propiedades mecánicas. La elección de uno u otro depende del grado de precisión con el que se desee trabajar. Los tres métodos expuestos son:

NIVEL DE EVALUACIÓN	CARACTERÍSTICAS
<b>a</b>	Es el método más estricto. La medición de todas las propiedades mecánicas está basada en normas de ensayo estandarizadas.
<b>b</b>	No todas las mediciones realizadas en este procedimiento están abaladas por normas de ensayo reconocidas.
<b>c</b>	No se efectúa ningún tipo de medición. Todos los valores son extraídos de tablas proporcionadas por la misma normativa. Algunos de estos valores se deben multiplicar por 0,8.

Tabla 3.5 Métodos de evaluación de las propiedades mecánicas. Fuente: ISO 12215-5:2008

Como cabe esperar, el nivel de evaluación que más se ajusta a las necesidades de este proyecto es el *método c*. Por lo que todos los valores referentes a las propiedades mecánicas son proporcionados por el *Anexo C*.

Retomando el tema principal de este apartado, la norma dictamina que el espesor mínimo de los paneles constituidos por fibra de vidrio debe ser calculado mediante la formulación 3.29, independientemente de si el panel está ubicado en el fondo o en el costado:

$$t = b \times k_c \times \sqrt{\frac{P \times k_2}{1000 \times \sigma_d}} \text{ [mm]} \quad (3.29)$$

Donde:

- $t$ , espesor mínimo del panel, [mm].
- $k_c$ , factor de corrección de curvatura de los paneles curvos.
- $P$ , es la mayor de las presiones calculadas para cada uno de los paneles, [kN/m<sup>2</sup>].
- $k_2$ , factor de alargamiento del panel por resistencia a la flexión.
- $\sigma_d$ , tensión de diseño de un panel de fibra reforzada, [N/mm<sup>2</sup>].

Como se puede observar, todavía resta obtener el valor de algunos parámetros. El procedimiento puede llegar a resultar tedioso, por lo que en los siguientes apartados se exponen los pasos necesarios para la determinación de cada uno de ellos.

### 1.6.1 FACTOR DE CORRECCIÓN DE CURVATURA $k_c$

Los valores entre los que oscila este factor se encuentran tabulados. Dependiendo de la relación entre el abombamiento del panel y la menor dimensión del mismo se calcula de una manera u otra:

$c/b$	$k_c$
$< 0,03$	1
$0,03 - 0,18$	$1,1 - \frac{3,33 c}{b}$
$> 0,18$	0,5

Tabla 3.6 Factor de corrección de curvatura  $k_c$ . Fuente: ISO 12215-5:2008

Donde:

- $c$ , calculada mediante el software *Rhinoceros*. Es el abombamiento del panel [mm]. En la figura 3.4 se muestra un ejemplo para la medición de la curvatura.

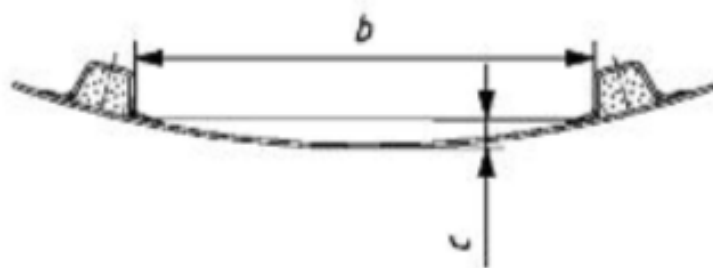


Figura 3.4 Medición de la curvatura de un panel. Fuente: ISO 12215-5:2008

Finalmente, el valor  $k_c$  siempre debe estar comprendido entre:

$$0,5 \leq k_c \leq 1 \quad (3.30)$$

Para el panel A1, el valor  $k_c$  equivale:

$$k_c = 1 \quad (3.31)$$

Obtiene este valor debido a que el panel A1 está provisto de una mínima curvatura, por lo que la relación  $c/b$  se encuentra muy cercana a 0, y por ende  $k_c$  es igual a 1.

### 1.6.2 FACTOR DE ALARGAMIENTO DEL PANEL POR RESISTENCIA A LA FLEXIÓN $k_2$

Al igual que en el apartado predecesor, todos los potenciales valores están recogidos en una tabla. El cálculo de este factor está basado en la relación entre las dos dimensiones principales de los paneles. La siguiente tabla muestra los resultados:

$l/b$	$k_2$
>2	0,5
2	0,497
1,9	0,493
1,8	0,487
1,7	0,479
1,6	0,468
1,5	0,454
1,4	0,436
1,3	0,412
1,2	0,383
1,1	0,349
1	0,308

T

Tabla 3.7 Factor de alargamiento por resistencia a la flexión  $k_2$ . Fuente: ISO 12215-5:2008

Indicar que cuando se obtenga una relación  $l/b$  comprendida entre dos valores de la tabla se debe realizar una regresión lineal para el cálculo de  $k_2$ , como por ejemplo en el caso del panel A1:

$$\frac{l}{b} = \frac{508}{412,75} = 1,23 \quad (3.32)$$

$$k_2 = \frac{0,412 - 0,383}{1,3 - 1,2} (1,23 - 1,2) + 0,383 = 0,3917 \quad (3.33)$$

### 1.6.3 TENSIÓN DE DISEÑO $\sigma_d$ PARA UN PANEL DE FIBRA DE REFORZADA

Para poder llegar a calcular esta tensión de diseño  $\sigma_d$  se ha de consultar el *Anexo C* de la norma. Ésta establece que para un panel de fibra de reforzada:

$$\sigma_d = \frac{\sigma_{uf}}{2} [N/mm^2] \quad (3.34)$$

Donde:

- $\sigma_{uf}$ , es la resistencia a rotura por flexión de un panel de fibra reforzada,  $[N/mm^2]$ .

A su vez,  $\sigma_{uf}$  se obtiene de la siguiente expresión:

$$\sigma_{uf} = (502 \psi^2 + 107) \times 0,8 \quad (3.35)$$

Donde:

- $\psi$ , es el contenido nominal de fibra de vidrio en masa. Este valor varía dependiendo de la técnica de laminado empleada y la proporción en masa del contenido de mat con respecto a la masa total del laminado. Considerando que se hace un laminado por contacto manual:

$$\psi = 0,46 - 0,18 R \quad (3.36)$$

$$R = \frac{\text{masa total de mat}}{\text{masa total de vidrio en el laminado (mat + roving)}} \quad (3.37)$$

El valor de las tensiones es el mismo para todos los paneles, por lo que se adjunta una tabla con todos los valores calculados:

PARÁMETROS		TENSIONES (N/mm <sup>2</sup> )	
R	$\psi$	$\sigma_{uf}$	$\sigma_d$
0,5	0,37	140,57	70,28

Tabla 3.8 Obtención de la tensión de diseño  $\sigma_d$ . Fuente: Propia

#### 1.6.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Uno de los pasos finales para la conclusión de este bloque consiste en aplicar la expresión 3.29 para cada uno de los paneles estudiados. Cabe aclarar que con el fin de diseñar un escantillonado lo más realista posible se ha considerado que la embarcación navega en la peor de las condiciones estudiadas. Es decir, se ha escogido el valor de presión más elevado resultante del apartado 6.5.

Los resultados obtenidos aparecen reflejados en la tabla 3.9:

PANEL	UBICACIÓN	P CRÍTICA (kN/mm <sup>2</sup> )	ESPESOR MÍNIMO (mm)
A1	FONDO	13,56	3,59
A2	FONDO	13,75	2,25
B1	FONDO	14,25	3,72
B2	FONDO	14,26	2,76
C1	FONDO	14,84	3,88
C2	FONDO	14,71	2,79
D1	FONDO	15,77	3,97
D2	FONDO	15,49	2,91
E1	FONDO	16,52	4,08
E2	FONDO	16,68	3,17
F1	FONDO	17,26	4,21
F2	FONDO	18,54	1,84
G1	FONDO	13,84	2,27
H1	FONDO	14,16	2,20

A3	COSTADO	6,62	1,16
A4	COSTADO	4,51	0,74
B3	COSTADO	8,27	1,63
B4	COSTADO	6,01	0,73
C3	COSTADO	9,27	2,29
C4	COSTADO	6,69	0,83
D3	COSTADO	10,55	2,85
D4	COSTADO	7,32	1,20
E3	COSTADO	11,75	2,38
E4	COSTADO	7,85	2,04
F3	COSTADO	13,09	1,73
F4	COSTADO	8,22	2,32
G2	COSTADO	13,62	1,65
G3	COSTADO	13,34	1,74
G4	COSTADO	7,99	1,66
G5	COSTADO	7,65	1,52
H2	COSTADO	12,70	1,85
H3	COSTADO	11,54	1,78
H4	COSTADO	7,29	1,60
H5	COSTADO	5,84	1,83

Tabla 3.9 Espesores mínimos de los paneles. Fuente: Propia

*Una de los indicadores que corrobora que los resultados son coherentes es que las presiones más elevadas tienen lugar en los fondos del casco tal y como era de esperar. Otro dato que argumenta la lógica de los datos obtenidos es que, para los paneles de costado situados en una misma posición longitudinal, la*



*presión disminuye a medida que aumenta su distancia con respecto a la línea de flotación ( $k_z$ ).*

*Escrutando la tabla 3.9, se concluye que el panel que necesita un mayor espesor es el F1 con un escantillonado de 4,21 mm para poder garantizar la estanqueidad del casco. Este mismo valor se toma como espesor mínimo para todos los paneles con el fin de evitar grandes diferencias de espesores entre las distintas regiones del casco.*

*La tabla muestra unos espesores relativamente pequeños. Esto es consecuencia de que se trata de una embarcación de dimensiones reducidas la cual está conformada por un gran número de paneles en el sentido longitudinal.*

## 1.7 ESCANTILLONADO PROPUESTO

El proceso consecutivo al cálculo del mínimo escantillonado es proponer una secuencia de laminado que se ajuste a las necesidades obtenidas en el apartado anterior. Se trata de un proceso menos complejo y laborioso que la determinación del espesor mínimo. Únicamente se deben respetar unos valores tabulados proporcionados por la norma. Éstos son:

$\psi$	0,25	0,30	0,36	0,38	0,41	0,50	0,55	0,58	0,60	0,66
$t/w$	2,89	2,34	1,87	1,75	1,59	1,22	1,07	0,99	0,95	0,82

Tabla 3.10 Determinación del espesor del laminado propuesto. Fuente: ISO 12215-5:2008

Donde:

- $w$ , es la masa de fibra seca por superficie del material, [ $\text{kg/m}^2$ ].

Para los valores que no se encuentren en tabla, se ha de efectuar la regresión lineal pertinente.

Para este proyecto:

$$\frac{t}{w} = \frac{1,75 - 1,87}{0,38 - 0,36} \times (0,37 - 0,36) + 1,87 = 1,81 \quad (3.38)$$

Finalmente, solo resta añadir la secuencia de laminado propuesta y el espesor resultante:

SECUENCIA	MATERIAL	PESO (kg/m <sup>2</sup> )	Espesor (mm)
1	Gelcoat	-	-
2	Velo de superficie	0,08	0,14
3	Mat 400	0,4	0,72
4	Mat 450	0,45	0,81
5	Roving 550	0,55	1,00
6	Roving 550	0,55	1,00
7	Mat 450	0,45	0,81
8	Mat 450	0,4	0,72
9	Roving 550	0,55	1,00
10	Roving 550	0,55	1,00
11	Mat 450	0,45	0,81
12	Mat 400	0,4	0,72
		<b>t propuesto (mm)</b>	<b>8,74</b>

Tabla 3.11 Secuencia de laminado propuesta. Fuente: Propia

La tabla 3.11 evidencia que el laminado propuesto supera con creces el escantillonado mínimo y por lo tanto es totalmente válido. Este espesor es aplicado a todo el casco de la embarcación para evitar la formación de zonas irregulares en su superficie.

## 2 RESISTENCIA AL AVANCE

En los siguientes apartados se pretende calcular de forma estimada la resistencia al avance de la embarcación modelada. El propósito final es corroborar que la potencia de los motores especificada en la tabla 2.3 es capaz de propulsar la motora.

Sin embargo, antes de proceder a calcular la potencia requerida, se considera necesario explicar brevemente cada uno de los factores que conforman la resistencia al avance. De manera general, dicha resistencia es el resultado de la interacción entre fenómenos viscosos y gravitatorios. Se considera que ambos dependen de dos parámetros adimensionales, el *número*

de *Reynolds* y el *número de Froude* respectivamente. Estos se calculan a través de las siguientes expresiones:

$$R_n = \frac{VL}{\nu} \quad (3.39)$$

$$F_n = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (3.40)$$

Donde:

- $R_n$ , Número de Reynolds.
- $V$ , Velocidad de la embarcación, [m/s].
- $L$ , Eslora de la embarcación, [m].
- $\nu$ , Viscosidad dinámica, [m<sup>2</sup>/s].
- $F_n$ , Número de Froude.
- $g$ , gravedad, [9,81 m/s<sup>2</sup>].

Por lo tanto, se puede afirmar que:

$$R_T = R_v + R_\omega \quad (3.41)$$

$$R_T = R_{\text{Fricción}} + R_{\text{Presión Viscosa}} + R_\omega \quad (3.42)$$

Las expresiones 3.41 y 3.42 hacen referencia a la descomposición de la resistencia total al avance  $R_T$ . Se aprecia que ésta es combinación de la resistencia viscosa ( $R_v$ ) y la resistencia por formación de olas ( $R_\omega$ ). Al mismo tiempo, la primera se puede dividir en dos subgrupos, la resistencia por fricción ( $R_{\text{Fricción}}$ ), y la resistencia por presión de origen viscoso ( $R_{\text{Presión Viscosa}}$ ).

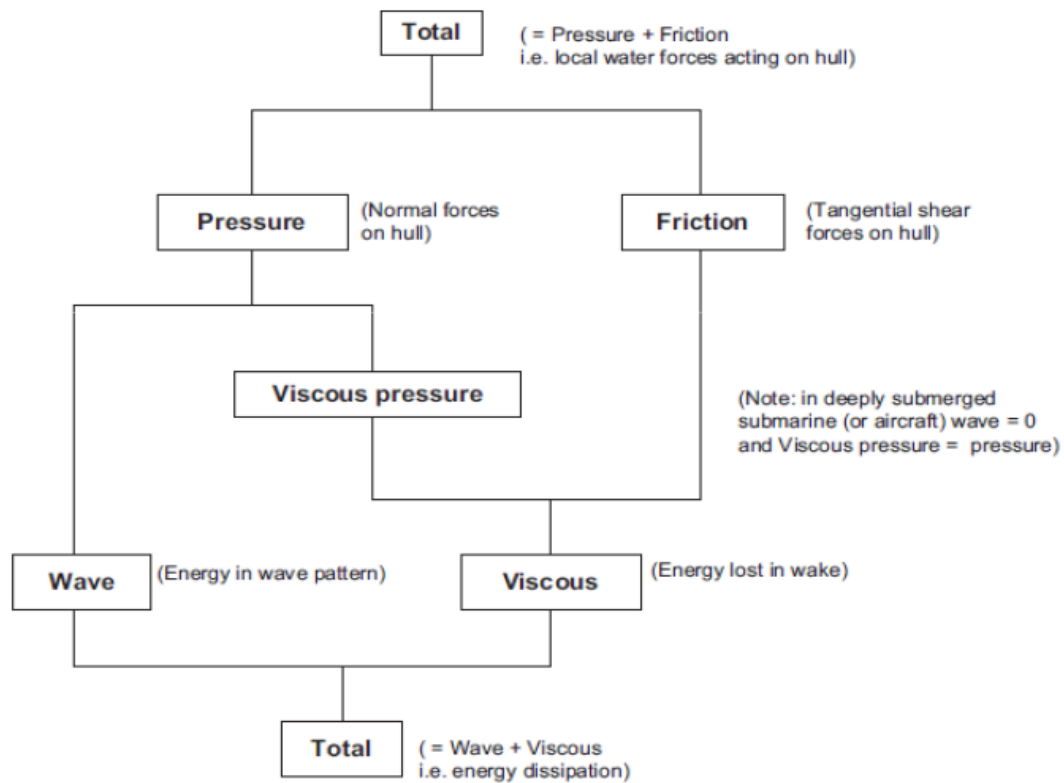


Figura 3.5 Descomposición de la resistencia al avance. Fuente: Apuntes de la asignatura de propulsores.

En la figura 3.5 se puede observar la descomposición descrita de la resistencia al avance. Además, también añade una nueva clasificación teniendo en cuenta el tipo de esfuerzo que supone la resistencia, tangencial o normal a la obra viva.

Seguidamente, en los posteriores apartados se explica de manera resumida cada una de las resistencias mencionadas en la formulación de la ecuación 3.42.

## 2.1 RESISTENCIA POR FRICCIÓN

Es una resistencia de índole viscosa, fruto de la interacción entre la obra viva y el agua. Para su estimación se considera que la embarcación se comporta como una placa plana equivalente, entiendo como tal aquella placa que presente la misma eslora y superficie mojada que la embarcación o el buque.

Definido el concepto de placa plana equivalente, se detalla lo que ocurre cuando se hace circular un fluido a través de su superficie. Considérese el clásico ejemplo de un flujo entre dos placas planas, la superior se desplaza a una velocidad  $V$ , mientras que la inferior es fija. Respetando la

condición de no deslizamiento se concluye que la lámina de agua adyacente a la placa y ésta se desplazan a la misma velocidad. Asimismo, la velocidad de las sucesivas láminas de agua disminuye hasta anularse una vez entra en contacto con la placa inferior. Por lo tanto, se produce un gradiente de velocidades entre ambas placas debido a la viscosidad del fluido.

Por otro lado, asimilando la embarcación a una placa plana se obtiene el mismo resultado. En esta ocasión se considera que es el fluido el que ataca a la motora. Lo que sucede es que la lámina de agua en contacto con la obra viva se adhiere a la misma, siendo su velocidad nula. A continuación, la velocidad de las siguientes láminas va en aumento hasta alcanzar la velocidad de ataque del fluido. Todas las velocidades que se encuentran en este gradiente conforman el espesor de la capa límite de un fluido, es decir aquella zona donde la velocidad del fluido se ve perturbada por la presencia de un sólido.

Con esta explicación se quiere evidenciar que la resistencia por fricción está íntimamente ligada con la viscosidad del fluido por la que se desplaza un cuerpo, y por ende con el número de Reynolds. Para la determinación del valor de esta resistencia es común emplear una serie de ecuaciones conocidas como líneas de fricción. Asiduamente los cálculos se basan en la ITTC-57, que indica:

$$C_{fpp} = \frac{0.075}{(\log R_n - 2)^2} \quad (3.43)$$

Posteriormente, se cuantifica la resistencia por fricción:

$$R_{Fricción} = C_{fpp} \frac{1}{2} \rho S V^2 \quad (3.44)$$

Donde:

- $C_{fpp}$ , coeficiente de fricción de placa plana.
- $\rho$ , densidad del fluido, [kg/m<sup>3</sup>].
- $S$ , superficie mojada del casco, [m<sup>2</sup>]
- $V$ , velocidad de la embarcación, [m/s].

## 2.2 RESISTENCIA POR PRESIÓN DE ORIGEN VISCOSO

Tal y como su nombre indica, este tipo de resistencia por presión es originado por fenómenos viscosos. A causa de las formas del casco y el número de Reynolds se producen aceleraciones y

desaceleraciones alrededor de la obra viva, y en consecuencia diferencias de presiones entre distintos puntos de la embarcación. En aquellas localizaciones en las que el flujo presenta una mayor velocidad la presión se ve disminuida, en contrapartida, cuando la velocidad disminuya la presión aumenta. Para ejemplificarlo se proporciona la ecuación de Bernoulli:

$$\frac{V^2 \rho}{2} + P + \rho g z = cte \quad (3.45)$$

Donde:

- $P$ , presión del fluido en el punto considerado, [N/m<sup>2</sup>].
- $z$ , altura del punto considerado respecto al sistema de referencia, [m].

Cabe indicar que para que la explicación anterior se cumpla, se debe considerar que los distintos puntos de estudio se localizan en un mismo plano horizontal, anulándose de este modo el tercer sumando de la ecuación 3.45. De este modo, una distribución presión habitual es la que presenta la figura 3.6:

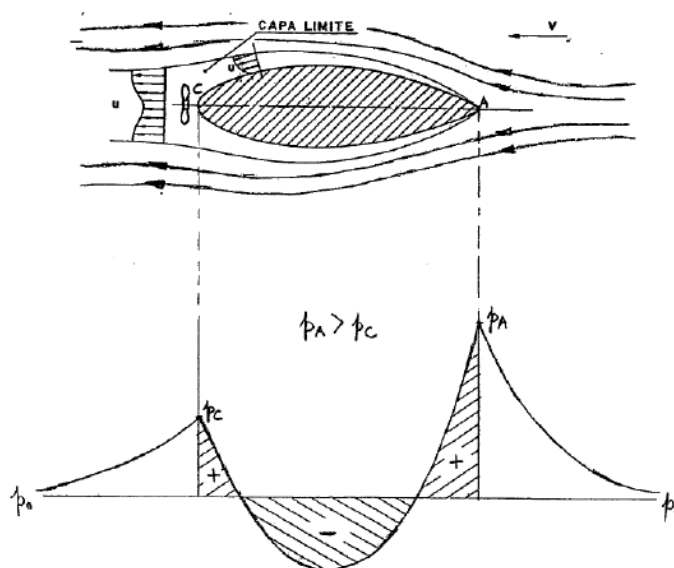


Figura 3. 6 Distribución presiones de origen viscoso. Fuente: Apuntes de la asignatura de propulsores.

La figura 3.6 muestra la diferencia de presión generada entre la proa y la popa de la embarcación, lo que implica una mayor resistencia al avance. Una de las posibles soluciones está basada en limitar la curvatura longitudinal de las embarcaciones y variar el ángulo de ataque del fluido.

### 2.3 RESISTENCIA VISCOSA

La combinación de las dos últimas resistencias estudiadas da lugar a la resistencia viscosa ( $R_v$ ) mencionada en la ecuación 3.42. Como se ha visto en el apartado anterior, no se dispone de ninguna expresión que permita estimar la resistencia por presión de origen viscoso ( $R_{Presión\ Viscosa}$ ). Para su cálculo se parte del coeficiente de fricción de placa plana obtenido mediante la ecuación 3.46. Seguidamente, se le aplica un factor de corrección  $k$ , también conocido como *factor de formas*, que tenga en cuenta la resistencia por presión de origen viscoso generada por las formas de la embarcación. De este modo, ya se disponen de todos los elementos necesarios para cuantificar la resistencia viscosa ( $R_v$ ):

$$C_v = (1 + k)C_{fpp} \quad (3.46)$$

$$R_v = C_v \frac{1}{2} \rho S V^2 \quad (3.47)$$

Donde:

- $C_v$ , coeficiente viscoso.
- $k$ , factor de formas.

### 2.4 RESISTENCIA POR FORMACIÓN DE OLAS

El último factor referente a la resistencia al avance es la componente relacionada con la formación olas. En este sentido es importante estudiar los patrones de olas generados por la embarcación en función de la velocidad de la misma, ya que se puede dar el caso de que las olas interfieran constructiva o destructivamente, y en consecuencia aumentando o disminuyendo esta índole de resistencia.

En cuanto a su cálculo, no existe ningún tipo de formulación que permita obtener su valor. Sino que la resistencia por formación de olas resulta del estudio del comportamiento de prototipos a escala en canales de ensayo combinado con el empleo de algunas de las ecuaciones anteriores.

### 2.5 CÁLCULO DE LA RESISTENCIA AL AVANCE

Tras la explicación teórica relacionado con la resistencia al avance de una embarcación, es el momento preciso de comprobar si la potencia que establece la ficha técnica de la embarcación es suficiente para la propulsión de la motora.

Para la corroboración de dichos datos ha sido necesario el apoyo de herramientas CFD, concretamente del programa *Maxsurf Resistance*. Este software otorga la posibilidad de calcular la resistencia al avance y la potencia requerida de manera rápida y eficaz. Además, su interfaz permite escoger el método se considere oportuno para la efectuación de los cálculos dependiendo de la tipología de embarcación estudiada.

Dentro del contexto de la motora modelada, el procedimiento que más se ajusta a su estudio es el método *Savitsky*. La elección de este método viene argumentada debido a que es ideal para embarcaciones que trabajan en modalidad planeadora, condición que cumple con creces la motora del proyecto tal y como se demuestra a continuación. Para argumentar que la motora estudiada es una planeadora previamente se ha de calcular su número de *Froude*:

$$F_n = \frac{V}{\sqrt{gL}} = \frac{13,89 \text{ m/s}}{\sqrt{9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 5,79 \text{ m}}} = 1,84 \quad (3.48)$$

Según el *número de Froude* las embarcaciones se clasifican en:

- Desplazamiento. Presentan un  $F_n < 0,6$ . Suelen ser embarcaciones de baja velocidad. El peso de la embarcación es contrarrestado casi en su totalidad por fuerzas hidrostáticas.
- Semi-desplazamiento. Conforman este grupo las embarcaciones que cumplen  $0,6 < F_n < 1,3$ . Se encuentran en una situación entre las de desplazamiento y planeadoras. Las fuerzas hidrodinámicas empiezan a cobrar importancia y empiezan a elevar el centro de gravedad de la embarcación.
- Planeadoras. Este grupo engloba a todas las embarcaciones con un  $F_n > 1,3$ . Las fuerzas hidrodinámicas son considerables y el efecto de sustentación se evidencia, reduciéndose la superficie mojada de la embarcación y en consecuencia la resistencia al avance.

Respetando este criterio de clasificación, se confirma que la motora del proyecto se desplaza en modalidad de planeo y que por lo cual se puede hacer uso del método *Savitsky*.



## 2.6 CÁLCULO DE LA RESISTENCIA AL AVANCE MEDIANTE MAXSURF RESISTANCE

Acto seguido, se da paso al estudio de la resistencia al avance de la motora del proyecto mediante el uso del programa *Maxsurf Resistance*. Antes de obtener los resultados se debe introducir el rango de velocidades que se desea estudiar. Partiendo de que la velocidad máxima que puede alcanzar la motora según el constructor es de 27 kn, se estima oportuno abarcar las velocidades comprendidas entre 5 y 60 kn para poder evaluar mejor la tendencia de los gráficos.

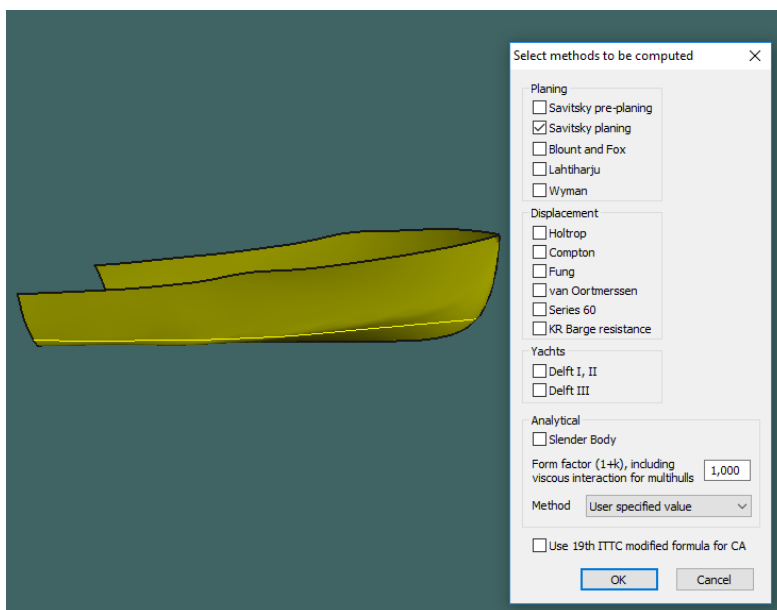


Figura 3.7 Selección del método para el cálculo de la resistencia al avance. Fuente: Propia

En la imagen se detallan algunos de los métodos de los que dispone el software para el cálculo de la resistencia al avance. Una vez seleccionado el método *Savitsky* se obtienen los siguientes resultados:

VELOCIDAD (kn)	RESISTENCIA AL AVANCE (kn)	POTENCIA (kW)
5	--	--
6,375	--	--
7,75	--	--
9,125	0,7	3,494
10,5	0,8	4,563
11,875	0,9	5,686
13,25	1	6,812
14,625	1,1	7,939
16	1,1	9,102
17,375	1,2	10,343
18,75	1,2	11,702
20,125	1,3	13,211
21,5	1,3	14,895

22,875	1,4	16,776
24,25	1,5	18,872
25,625	1,6	21,199
27	1,7	23,772
28,375	1,8	26,605
29,75	1,9	29,71
31,125	2,1	33,101
32,5	2,2	36,788
33,875	2,3	40,784
35,25	2,5	45,101
36,625	2,6	49,75
38	2,8	54,743
39,375	3	60,091
40,75	3,1	65,804
42,125	3,3	71,895
43,5	3,5	78,374
44,875	3,7	85,252
46,25	3,9	92,541
47,625	4,1	100,251
49	4,3	108,394
50,375	4,5	116,979
51,75	4,7	126,019
53,125	5	135,524
54,5	5,2	145,504
55,875	5,4	155,972
57,25	5,7	166,936
58,625	5,9	178,409
60	6,2	190,4

Tabla 3.12 Valores de resistencia al avance y potencia efectiva de la motora Caballero.

Para facilitar la lectura de los datos se añade un gráfico que muestra la resistencia al avance y la potencia efectiva requerida por la embarcación:

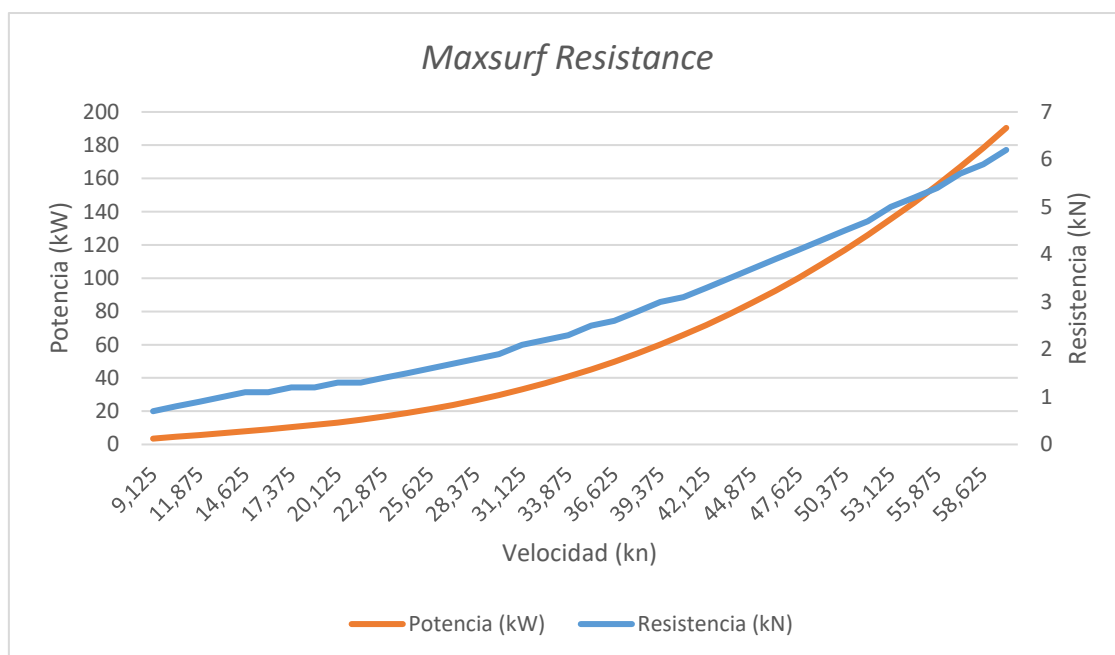


Figura 3.8 Gráfico Potencia & Resistencia al avance vs Velocidad mediante Maxsurf Resistance. Fuente: Propia

Uno de los hechos más significativos que muestra este gráfico es la baja resistencia que presenta la embarcación. La motora debe vencer una resistencia de 1,7 kN cuando alcanza su velocidad máxima, los 27 kn.

En cuanto a las potencias, el constructor proponía 3 casos distintos de propulsión dependiendo de la velocidad máxima que se deseara alcanzar. En la tabla 3.13 se recogen todas las situaciones:

CASO	VELOCIDAD MÁXIMA (kn)	Nº DE MOTORES	POTENCIA DE CADA MOTOR/TOTAL (HP)	POTENCIA EFECTIVA REQUERIDA (kW)	POTENCIA EFECTIVA REQUERIDA (HP)
1	17	1	25/25	10	13,41
2	27	2	25/50	23,78	31,89
3	21	1	33/33	14,28	19,15

Tabla 3.13 Comprobación de potencias. Fuente: Propia

A simple vista parece ser que todos los motores son capaces de propulsar la embarcación. Es importante no confundir la potencia generada por el motor con la necesaria para poder navegar a las velocidades recogidas en la tabla. Añadir que a la hora de elegir el sistema de propulsión se deben considerar la pérdida de eficiencia pertinente.

*Recuperando la información proporcionada por el gráfico, se observa que las curvas de resistencia al avance y de potencia requerida presentan una tendencia similar. Es significativo que ambas tengan un comportamiento prácticamente lineal hasta alcanzar la velocidad máxima establecida por el constructor. Se aprecia que a partir de velocidades cercanas a los 28 kn la tendencia lineal desaparece dando lugar a un aumento progresivo de la pendiente a medida que aumenta la velocidad, sobre todo en el caso de la potencia.*

*La pendiente de este gráfico otorga una información sumamente importante, ya que indica que una vez alcanzada la máxima velocidad se reduce la proporcionalidad velocidad/potencia. Es decir, es necesario aumentar considerablemente la potencia del motor para dotar de un ligero incremento de velocidad a la embarcación.*

Además de poder estudiar la resistencia al avance y la potencia necesaria, *Maxsurf Resistance* también permite estudiar el trimado de la embarcación para el rango de velocidades estudiado. El resultado es el siguiente:

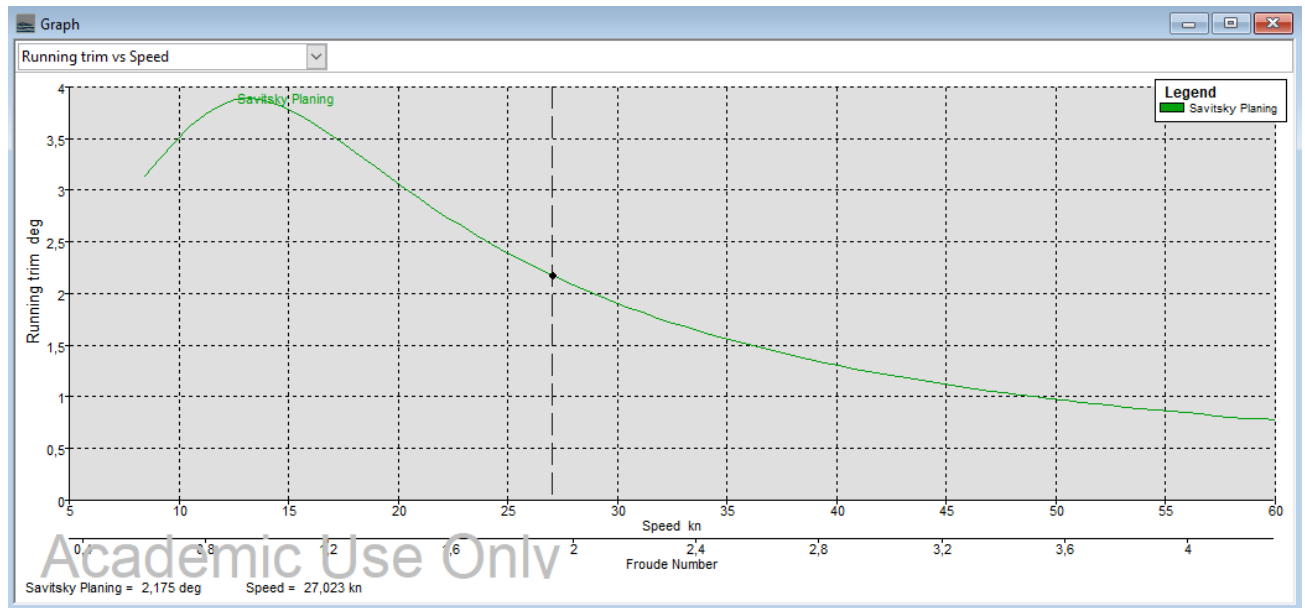


Figura 3.9 Trimado de la embarcación mediante Maxsurf Resistance. Fuente: Propia

De la figura 3.9 se extrae que:

CASO	TRIMADO (°)	VELOCIDAD (kn)
Trim <sub>Máx</sub>	3,89	13,24
Trim <sub>Máx velocidad</sub>	2,18	27

Tabla 3.14 Trimados de la embarcación. Fuente: Propia

## 2.7 METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE LA RESISTENCIA AL AVANCE MEDIANTE HOJA EXCEL

Para complementar y comprobar los valores resultantes del apartado anterior se ha optado por la realización del método *Savitsky* a partir de una hoja de cálculo. Esta hoja está basada en los pasos establecidos por el libro “*Principles of Yacht Design*” de *Lars Larsson* y *Rolf Eliasson*.

Antes de describir los pasos necesarios para la obtención de la resistencia al avance y la potencia efectiva se deben definir los siguientes parámetros:

- $L_{WL}$ , eslora de flotación [m].
- $b$ , manga [m].
- $m$ , desplazamiento [kg].
- $\rho$ , densidad [kg/m<sup>3</sup>].

- $\tau$ , ángulo de trimado, [°].
- $\beta$ , ángulo de astilla muerta, [°].
- $\nu$ , viscosidad cinemática [m<sup>2</sup>/s].
- $\lambda$ , ratio  $L_{WL}/b$ .
- $L_{CG}$ , posición longitudinal del centro de gravedad.
- $V_{CG}$ , posición vertical del centro d gravedad.
- $\varepsilon$ , ángulo que forman el eje de la hélice y la línea base, [°].
- $f$ , distancia vertical entre el eje de la hélice y el centro de gravedad de la embarcación [m].

De manera más visual:

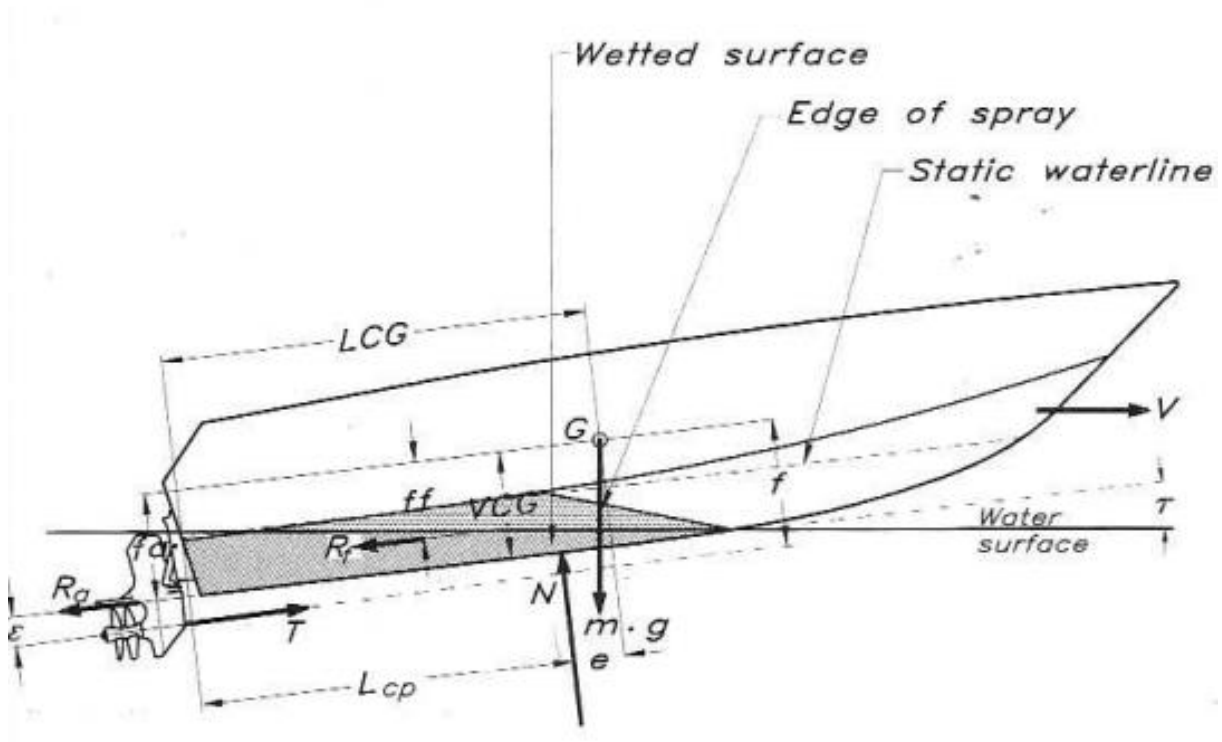


Figura 3.10 Parámetros del método Savitsky. Fuente: Larsson & Eliasson (2000)

A continuación, se detallan los pasos ejecutados para la elaboración de la hoja de cálculo.

Primeramente, se ha de calcular el coeficiente de velocidad  $C_V$ :

$$C_V = \frac{V}{\sqrt{g \cdot b}} \quad (3.49)$$

Seguidamente, el coeficiente de sustentación  $C_{L0}$  asumiendo un trimado  $\tau$  aleatorio:

$$C_{L0} = \tau^{1.1} (0,012 \lambda^{0.5} + 0,0055 \frac{\lambda^{2.5}}{C_V^2}) \quad (3.50)$$

El coeficiente de sustentación se introduce en la expresión 3.51 para obtener el coeficiente de sustentación de una placa plana con astilla muerta  $C_{L\beta}$ :

$$C_{L\beta} = C_{L0} - 0,0065 \cdot \beta \cdot C_{L0}^{0.6} \quad (3.51)$$

Posteriormente ya se puede calcular la resistencia por fricción  $R_f$ :

$$R_f = C_f \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot (\lambda + \Delta\lambda) \cdot \frac{b^2}{\cos \beta} \text{ [N]} \quad (3.52)$$

Donde:

$$C_f = \frac{0,0075}{(\log R_n - 2)^2} \quad (3.53)$$

El valor de  $\Delta\lambda$  se extrae del gráfico proporcionado por el libro “Principles of Yacht Design”:

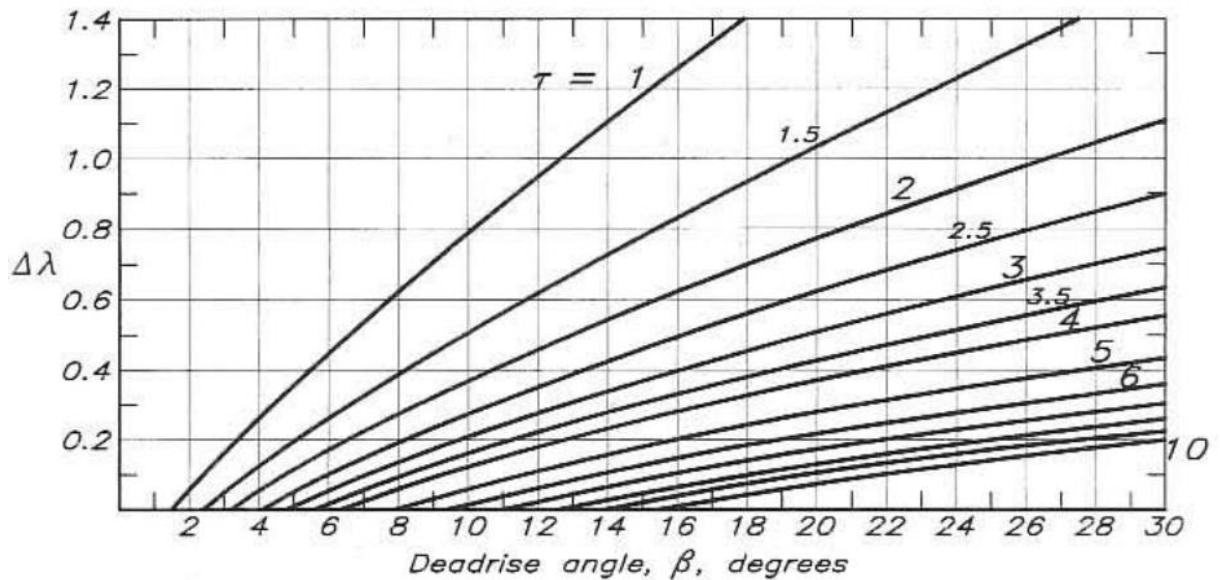


Figura 3.11 Obtención de  $\Delta\lambda$  en función de  $\tau$  y  $\beta$ . Fuente: Larsson & Eliasson (2000)

Después, se debe buscar la distancia entre la perpendicular de popa y el centro de presiones  $L_{CP}$ .

$$\frac{L_{CP}}{L_W} = 0,75 - \frac{1}{\frac{5,21 \cdot C_V^2}{\lambda^2} + 2,39} [m] \quad (3.54)$$

Al mismo tiempo, se halla el brazo de fuerza entre el centro de gravedad y la fuerza de fricción  $R_f$ . Paralelamente, también se calcula el brazo de fuerza  $e$  entre el centro de gravedad y el centro de presiones.

$$ff = V_{CG} - \frac{b}{4} \cdot \tan \beta [m] \quad (3.55)$$

$$e = L_{CG} - L_{CP} [m] \quad (3.56)$$

Obtenidos los brazos de fuerza ya se pueden computar los momentos ejercidos por las presiones  $M_h$  y por la resistencia por fricción  $M_f$ . Ambos momentos se suman para evaluar el equilibrio.

$$M_h = g \cdot m \left[ \frac{e \cdot \cos(\tau + \varepsilon)}{\cos \varepsilon} - f \frac{\sin \tau}{\cos \varepsilon} \right] [Nm] \quad (3.57)$$

$$M_f = R_f \cdot \left[ ff - e \cdot \tan \varepsilon - \frac{f}{\cos \varepsilon} \right] [Nm] \quad (3.58)$$

$$M_T = M_h + M_f [Nm] \quad (3.59)$$

Acto seguido, se vuelve a repetir el proceso modificando el ángulo de trimado considerado inicialmente. A partir de los dos casos estudiados se realizan las interpolaciones pertinentes para cuantificar la resistencia al avance y la potencia efectiva requerida por la motora.

$$\tau_0 = \tau_1 - \frac{M_1 \cdot (\tau_2 - \tau_1)}{M_2 - M_1} [^\circ] \quad (3.60)$$

$$R_{f0} = R_{f1} + \frac{R_{f2} - R_{f1}}{\tau_2 - \tau_1} (\tau_0 - \tau_1) [N] \quad (3.61)$$

$$R = [g \cdot m \cdot \sin \tau_0 + R_{f0}] \cdot \frac{\cos(\tau_0 + \varepsilon)}{\cos \varepsilon} [N] \quad (3.62)$$

$$P_E = V \cdot R [W] \quad (3.63)$$



## 2.8 CÁLCULO DE LA RESISTENCIA AL AVANCE MEDIANTE HOJA EXCEL

En el apartado anterior se han redactado los pasos y expresiones empleadas para la determinación de la resistencia al avance. En este punto del proyecto se exponen los valores de los parámetros iniciales, así como los resultados computados por la hoja de cálculo elaborada.

Como se citó con anterioridad, el primer paso es cuantificar ciertos parámetros. Éstos son:

PARÁMETROS INICIALES	
$L_{WL}$ (m)	5,33
$b$ (m)	1,96
$m$ (kg)	793,78
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1025
$\tau$ (°)	1
$\beta$ (°)	14,01
$u$ (m <sup>2</sup> /s)	$1,19 \cdot 10^{-6}$
$\Lambda$	2,72
$L_{CG}$ (m)	2,515
$V_{CG}$ (m)	0,38
$\varepsilon$ (°)	4
$f$ (m)	1,3

Tabla 3.15 Parámetros iniciales para el cálculo de la resistencia al avance. Fuente: Propia

Indicar que la posición calculada del centro de gravedad de la embarcación es provisional dado que únicamente se ha tenido en cuenta el peso del casco. Se ha determinado su localización a partir del peso del laminado propuesto en el punto 6.7 del proyecto. Para ello se ha considerado que el casco está compuesto por dos partes, el costado y el fondo y presentan las siguientes características:

UBICACIÓN	DENSIDAD SUPERFICIAL (kg/m <sup>2</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	PESO (kg)	X (m)	Z (m)	M <sub>x</sub> (kg·m)	M <sub>z</sub> (kg·m)
<b>COSTADO</b>	4,83	9,63	46,51	2,82	0,59	131,15	27,44
<b>FONDO</b>	4,83	7,16	34,58	2,11	0,117	72,96	4,045

Tabla 3.16 Propiedades del casco. Fuente: Propia

Para el cálculo del centro de gravedad se considera que ambas partes forman un sistema discreto. Se obtiene:

ESTIMACIÓN DEL CENTRO DE GRAVEDAD	
A <sub>TOT</sub> (m <sup>2</sup> )	16,52
P <sub>TOT</sub> (kg)	81,09
M <sub>X TOT</sub> (kg·m)	204,11
M <sub>Y TOT</sub> (kg·m)	31,49
L <sub>CG</sub> (m)	2,515
V <sub>CG</sub> (m)	0,388

Tabla 3.17 Localización del centro de gravedad provisional. Fuente: Propia

Otros parámetros a los que se les ha otorgado un valor aleatorio son el ángulo que forman el eje de la hélice y la línea base  $\varepsilon$ , y la distancia vertical entre el centro de gravedad y el eje de la hélice  $f$ . Se ha considerado que la hélice trabaja de forma casi paralela a línea base, por lo que se le aplica un valor de  $\varepsilon = 4^\circ$ . Por otro lado se decide considerar un valor de  $f = 1,3$  m.

Los resultados obtenidos mediante la hoja de cálculo son los siguientes:

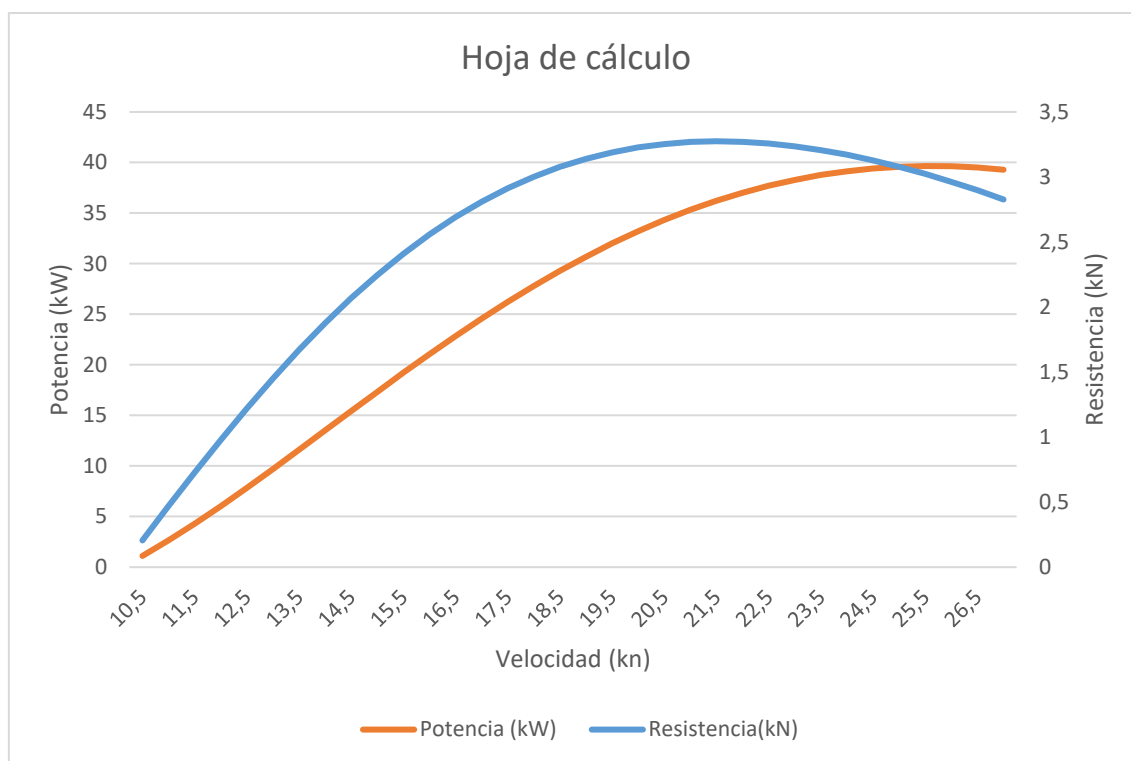


Figura 3.12 Gráfico Potencia & Resistencia al avance vs Velocidad mediante hoja de cálculo. Fuente: Propia

El gráfico fruto del método Savitsky a partir de una hoja Excel muestra unos valores semejantes a los obtenidos en Maxsurf Resistance, tanto la resistencia al avance como la potencia. La principal diferencia recae en la tendencia mostrada por la línea de la resistencia al avance, la cual alcanza un máximo de 3,2 kN entorno a los 21 kn aproximadamente en lugar de producirse cuando la navegación navega a la máxima velocidad, los 27 kn.

Este comportamiento está argumentado debido a que la embarcación trabaja en modalidad planeo. Es decir, a medida que la motora aumenta su velocidad el efecto de las fuerzas de sustentación empiezan a evidenciarse, causando una disminución de la superficie mojada del casco y por ende de la resistencia al avance.

Retomando la comparativa, ambos gráficos evidencian que la motora presenta una baja resistencia al avance y que requiere poca potencia para ser propulsada. Características consecuentes de las reducidas dimensiones de la

*embarcación. Finalmente, remarcar que la diferencia entre los dos casos estudiados puede ser debido a la asignación aleatoria de algunos o valores o bien de un posible error acumulado a la hora de ejecutar la hoja de cálculo.*

## 2.9 DETERMINACIÓN DEL SISTEMA DE PROPULSIÓN

El paso consecutivo al estudio a la resistencia al avance es la elección de un dispositivo propulsor que se adapte a las necesidades requeridas por la motora. La embarcación seleccionada está siempre propulsada por motores fueraborda, cuya potencia varía dependiendo de la velocidad máxima a la que se desee navegar. Se trata de un sistema de propulsión muy extendido en la náutica de recreo. Los rasgos que potencian su elección para esta motora son:

- Mejor aprovechamiento de los espacios. Evita disponer un espacio específico para la localización del motor en el interior de la embarcación.
- Mayor seguridad. La ausencia de eje de transmisión evita la existencia de la bocina y por lo tanto se reduce la posibilidad de filtraciones y aguas en sentinas. También se elimina la posibilidad de incendio provocado por la acumulación de gases en el compartimento del motor.
- Son motores muy compactos, ligeros y capaces de otorgar grandes potencias.
- No requiere uso de timón. Consecuentemente también desaparecen todos los elementos necesarios para su accionamiento. Además, también se reduce la resistencia al avance.
- Mantenimiento. En numerosas ocasiones evitan extraer la embarcación del agua. Es suficiente con quitar el motor fueraborda y aplicarle las tareas de reparación y/o mantenimiento necesarias.
- Reducción del tiempo en el agua. El motor únicamente se encuentra sumergido cuando la embarcación se halla operativa. De este modo se consigue aumentar considerablemente la vida útil del motor.
- El invernaje es más sencillo ya sea mediante bidón o acoplamiento de ventosas en el sistema de refrigeración.

## 2.10 DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA MÁXIMA DEL MOTOR, APLICACIÓN DE LA ISO 11592

El equipo propulsor elegido debe ser capaz de otorgar la potencia mínima que requiere la embarcación. No obstante, no todas las potencias son válidas para la motora estudiada. En otras palabras, la instalación de un sistema propulsor de potencia desmesurada podría provocar la reducción de eficiencia del sistema e incluso la pérdida de la gobernabilidad de la nave.

A fin de evitar este despropósito, la normativa *ISO 11592:2016 – Determinación de la potencia nominal máxima de propulsión utilizando la velocidad de maniobra. Parte 1: Embarcaciones de recreo de eslora menor de 8 m* expone las directrices a seguir para acotar correctamente la potencia del sistema propulsivo.

En el *Anexo C* de la norma se halla redactado el procedimiento para calcular la potencia máxima que se ajusta a las características de la motora.

El primer paso consiste en cuantificar el factor  $\lambda$  a través de esta ecuación:

$$\lambda = L_H \cdot B_T \quad (3.64)$$

Donde:

- $L_H$ , eslora del casco, [m].
- $B_T$ , manga del espejo de popa [m].

Luego, dependiendo del valor resultante de  $\lambda$  se consulta un gráfico para la extracción de la máxima potencia nominal. En este caso, dado que  $\lambda > 5,1$  se hace uso de esta fuente:

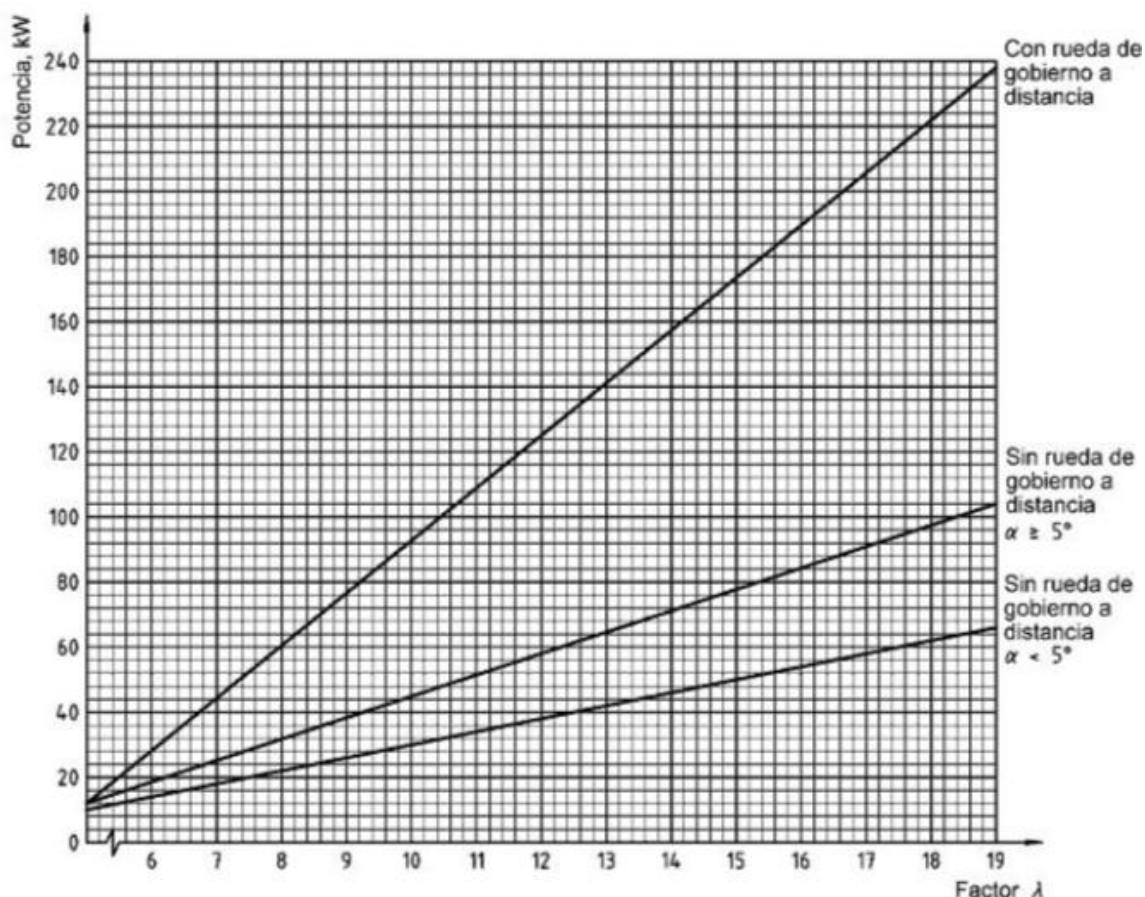


Figura 3.13 Obtención de la potencia máxima en función de  $\lambda$ . Fuente: ISO 11592-1:2001

Considerando que se hace uso de un sistema de gobierno a distancia, la potencia máxima que se podrá instalar a bordo es:

$L_H$ (m)	$B_T$ (m)	$\lambda$	P (kW)	P (HP)
5,79	1,46	8,45	68,6	92

Tabla 3.18 Máxima potencia soportada por la embarcación. Fuente: Propia

## 2.11 ELECCIÓN DEL MOTOR PRINCIPAL

Delimitados los rangos de potencia a los que debe estar sometida la embarcación únicamente resta la elección del motor acorde con estos parámetros. Para ello se emplearán los resultados obtenidos mediante *Maxsurf Resistance*.

Paralelamente, al motor seleccionado se le aplicarán unas pérdidas con el fin de realizar un cálculo más realista. Se considera que el equipo propulsor pierde eficiencia debido a pérdidas mecánicas y propio rendimiento de la hélice.

RENDIMIENTO DEL MOTOR (%)
35

Tabla 3.19 Rendimiento aproximado de un motor fueraborda. Fuente: [www.torqueedo.com](http://www.torqueedo.com)

Teniendo en cuenta esta consideración a los datos extraídos en la figura 3.12, se estima la potencia mínima que deben presentar los motores que se vayan a instalar en la mora:

CASO	VELOCIDAD MÁXIMA (kn)	Nº DE MOTORES	POTENCIA EFECTIVA REQUERIDA (HP)	POTENCIA NOMINAL (HP)	POTENCIA FABRICANTE (HP)
1	17	1	13,41	38,31	25
2	27	2	31,89	91,1	50
3	21	1	19,15	54,7	33

Tabla 3.20 Determinación de la potencia nominal del motor fueraborda. Fuente: Propia

*Respetando los resultados de los apartados anteriores, se observa que la potencia nominal de los motores dictaminada por el constructor es insuficiente en cualquier situación. Simultáneamente, la tabla evidencia que todas las potencias se encuentran por debajo del valor máximo permitido, 92HP.*

El último paso es la elección del motor fueraborda. Para evitar sobrecargar el trabajo, se considera que la motora navega en la *situación 3*, es decir que únicamente dispone de un motor y que su pico de velocidad se encuentra a 21 kn.

Tras valorar distintos dispositivos, se ha escogido el fueraborda *E-TEC 60CV* de la casa *EVINRUDE*. Este motor muestra las siguientes características:

MOTOR	
Tipo de moto	4 Tiempos
Cilindrada	863 cm <sup>3</sup>
N.º de cilindros/Configuración	2/Línea
Diámetro x Carrera	91 mm x 66 mm
Potencia	59,14 HP – 60 CV
Rango de funcionamiento a todo gas	5.500 – 6.000 rpm
Sistema de lubricación	Multipunto
Sistema de inyección de gasolina	Eléctrico
Sistema de arranque	Eléctrico
Relación de marchas	2,9:1
DIMENSIONES	
Altura del espejo recomendada	527 mm
Peso	109 kg
Capacidad del depósito de combustible	Independiente, 45,5 L
Capacidad del depósito de aceite	1,9 L
CARACTERÍSTICAS ADICIONALES	
Control	Remoto (Caña opcional)
Método de trimado e inclinación	Eléctrico

Tabla 3.21 Características del motor E-TEC 60 CV. Fuente: [www.evinrude.com](http://www.evinrude.com)





Figura 3.14 Motor fueraborda E-TEC 60 CV. Fuente: [www.evinrude.com](http://www.evinrude.com)

## 2.12 AUTONOMÍA DE LA EMBARCACIÓN

Otro punto a tener en cuenta a la hora de proyectar la embarcación es la autonomía que proporciona el motor fueraborda seleccionado. Atendiendo la ficha técnica facilitada por la casa, la maquinaria escogida muestra el siguiente comportamiento cuando se instala en una embarcación de dimensiones semejantes a las de la motora *Caballero*. Las dimensiones de esta embarcación de prueba son:

DIMENSIONES DE LA EMBARCAIÓN DE PRUEBA	
Eslora (m)	5,03
Manga (m)	2,13
Desplazamiento (kg)	861,62
Material del casco	GRP

Tabla 3.22 Dimensiones de la embarcación para el ensayo del motor fueraborda. Fuente: [www.evinrude.com](http://www.evinrude.com)

PERFORMANCE DATA				
RPM	MPH	GPH	MPG	RANGE
850	2.4	0.10	23.5	254
1000	2.9	0.10	28.5	308
1500	4.6	0.20	23.0	248
2000	5.7	0.50	11.4	123
2500	6.7	0.80	8.4	90
3000	7.5	1.45	5.1	55
3500	9.7	1.95	5.0	54
4000	16.0	2.30	6.9	75
4500	21.0	2.90	7.2	78
5000	23.7	3.35	7.1	76
5500	26.4	3.85	6.8	74
6000	29.4	4.80	6.1	66
Range (Miles) Based On 90% Fuel Capacity				

Figura 3.15 Consumos del motor E-TEC 60 CV. Fuente: [www.evinrude.com](http://www.evinrude.com)

Gracias a estos datos se ha extraído el consumo específico del motor cuando trabaja a un 75% de su capacidad:

$$C_e = \frac{\rho \cdot V_T \cdot V}{A \cdot P_{MP}} = \frac{680 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,04542m^3 \cdot 38,39 km/h}{45,63 CV \cdot 160,013 km} \quad (3.65)$$

Donde:

- $C_e$ , consumo específico, [kg/CV·h].
- $\rho$ , densidad del combustible, [kg/m<sup>3</sup>].
- $V_T$ , volumen del tanque de combustible [m<sup>3</sup>].
- $V$ , velocidad, [km/h].
- $A$ , autonomía, [km].
- $P_{MP}$ , potencia motor principal [CV].

RÉGIMEM DE TRABAJO (%)	$C_e$ (g/CV·h)
75	164,5

Tabla 3.23 Consumo específico del motor E-TEC 60 CV. Fuente: Propia

Extrapolando el valor de consumo específico resultante y suponiendo que para el mismo régimen de trabajo la motora *Caballero* navega a una velocidad 14 kn, se obtiene una autonomía de:

$$A = \frac{680 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,04542 m^3 \cdot 25,93 km/h}{45,63 CV \cdot 0,1645 \frac{kg}{CV \cdot h}} = 106,7 km \quad (3.66)$$

O lo que es lo mismo:

AUTONOMÍA DE LA EMBARCACIÓN (mn)
57,61

Tabla 3.24 Autonomía de la motora *Caballero*. Fuente: Propia

### 3 DISPOSICIÓN GENERAL

Las pequeñas dimensiones de la embarcación limitan mucho sus prestaciones, por lo que únicamente se han añadido aquellos elementos que se han considerado indispensables. No obstante, los espacios se han distribuido eficientemente para que la navegación de las personas que vayan a bordo sea agradable y confortable.

La motora está conformada por dos espacios bien diferenciados: la bañera y la cabina. El *Anexo IV* muestra la disposición general de la embarcación.

#### 3.1 ESPACIO DE BAÑERA

El propósito es disponer de una zona amplia y cómoda dado que es el punto social de la embarcación y por lo tanto donde se reúne un mayor número de personas. En la parte posterior se halla un banco que abarca toda la manga de la bañera. Paralelamente, el centro es presidido por una mesa con extremos abatibles para cubrir las necesidades de cada situación. Al mismo tiempo, se puede optar por desmontar la totalidad de la mesa y guardarla en los espacios de almacenamiento ubicados debajo de la bañera.

Por otro lado, el puesto de mando está ubicado en la zona más a proa de la bañera. En él se encuentran los dispositivos que facilitan la navegación, por ejemplo:

- Rueda de timón.
- Mando a distancia.
- Equipo VHF.

- Sistema de navegación.
- Indicadores de combustible, velocímetro, sonda, estado de las baterías, temperatura del aceite, etc.

### 3.2 ZONA DE CABINA

A la parte interior de la motora se accede a través de una pequeña escalera. Una vez dentro, en la parte de babor se ubica la zona de cocina, la cual está compuesta por:

- Nevera.
- Cocina a gas con tres fuegos.
- Microondas.
- Fregadero.
- Espacio de almacenamiento.

Justo enfrente de la cocina se encuentra la zona de servicio en forma de “L”. Éste dispone de inodoro, lavabo y plato de ducha.

Finalmente, en la zona de proa de la cabina se encuentra un camarote independiente con capacidad para dos personas. Ambas personas disponen de un armario propio para el almacenamiento de sus pertenencias.

## 4 ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD, ISO 12217

El apartado final de este proyecto está dedicado al estudio de la estabilidad de la motora. Como viene siendo habitual, nuevamente se vuelve a hacer uso de la normativa ISO para cerciorarse de que la embarcación cumple con unos parámetros mínimos de estabilidad. Dicha norma es la *UNE-EN ISO 12217:2017 – Pequeñas embarcaciones. Evaluación y clasificación de la flotabilidad y estabilidad. Parte 3: Embarcaciones de eslora inferior a 6 m.*

El propósito de esta directriz es proporcionar unos parámetros críticos a partir de los cuales la estabilidad se ve seriamente comprometida. Paralelamente, esta norma también establece los condicionantes para determinar la categoría de diseño de una embarcación.

Por el contrario, aun cumpliendo todos los requisitos establecidos, la norma no garantiza con total seguridad la estabilidad de la embarcación, por lo que la posibilidad de hundimiento o vuelco sigue estando presente.

#### 4.1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN

La *ISO 12217 -3:2017* solamente es aplicable para aquellas embarcaciones que dispongan de una eslora inferior a 6 metros y naveguen a vela, a motor o estén propulsadas por medios humanos. Esta directriz no es aplicable a:

- Embarcaciones neumáticas.
- Motos de agua y tablas de surf a vela.
- Canoas y kayacks.
- Góndolas y pedalones.
- Aerodeslizadores y hovercrafts.

#### 4.2 ENSAYOS A APLICAR A LAS EMBARCACIONES NO PROPULSADAS A VELA

Para la evaluación de la estabilidad, la normativa ofrece una tabla que detalla los ensayos a aplicar dependiendo de la eslora, equipo propulsor, las cubiertas y la categoría de diseño que se pretenda conseguir. Se debe escoger la opción que más se adecúe a los intereses del propietario:

OPCIÓN	1	2	3	4	5	6
Aplicable a	$L_H < 6 \text{ m}$			$4,8 \text{ m} \leq L_H \leq 6 \text{ m}$		
Posibles categorías de diseño	C y D	C y D	D	C y D	D	C y D
Potencia máxima	Cualquiera	Cualquiera	$\leq 3 \text{ kW}$	Cualquiera	Cualquiera	Cualquiera
Tipo de instalación de motor	Cualquiera	Cualquiera	Cualquiera	Cualquiera	Cualquiera	Intraborda
Cubierta	Todas, excepto totalmente cerradas	Totalmente cerradas	Todas, excepto totalmente cerradas	Cubierta parcial	Todas, excepto totalmente cerradas	Todas, excepto totalmente cerradas
Ensayo de altura de inundación	✓	✓	-	✓	✓	✓
Tamaño de los nichos	-	✓	-	-	-	-

Ensayo de compensación de carga	✓	✓	-	✓	✓	✓
Escora debido a la acción del viento	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Tipo de flotabilidad	-	-	✓	-	-	✓
Ensayo de flotación	✓	-	✓	-	-	✓
Materiales de flotación	✓	-	✓	-	-	✓
Ensayo de recuperación	-	-	✓	-	-	-
Detección y achique de agua	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tabla 3. 25 Ensayos a aplicar. Fuente: ISO 12217-3:2017

Valorando el abanico de posibilidades que ofrece la tabla 3.25, las opciones que se pueden aplicar a la embarcación que posibilitan el acceso a las categorías de diseño C y D, son la 1ª y 4ª. Ahora bien, ya que la motora dispone de una eslora comprendida entre 4,8 y 6 m, se opta por la elección del cuarto escenario ya que requiere de la realización de un menor número de ensayos para poder optar a las mismas categorías.

Asimismo, añadir que se entiende que una embarcación dispone de una cubierta totalmente cerrada cuando su proyección horizontal está compuesta por la combinación de los siguientes elementos:

- Cubiertas estancas y/o superestructuras.
- Nichos de achique rápido que cumplan con la norma *ISO 11812*.
- Nichos estancos que cumplan con la *ISO 11812* con un volumen inferior a  $(L_H B_H F_M/40)$ .

Dado que no se ha comprobado la estanqueidad de la bañera mediante la ISO 11812 se estima oportuno considerar que la motora del proyecto dispone de una cubierta parcialmente cerrada.

### 4.3 ENSAYO DE ALTURA DE INUNDACIÓN REQUERIDA

El anexo A de la normativa dictamina los pasos a efectuar para el cálculo de la altura de inundación requerida. Se debe repetir este ensayo para cada una de las aperturas inundables de la embarcación. En este caso, se efectuará para la bañera.

El método está basado en la aplicación de la siguiente expresión:

$$H_{D(R)} = H_1 \times F_1 \times F_2 \times F_3 \times F_4 \times F_5 \quad (3.67)$$

Donde:

- $H_1 = L_H/15$ .

#### 4.3.1 FACTOR DE POSICIÓN DE LA ABERTURA $F_1$

Debe ser un valor comprendido entre 0,5 y 1. Se puede obtener mediante dos vías distintas:

- i)  $F_1 = 1$  cuando la abertura se localiza en los bordes de la embarcación.
- ii)  $F_1 = (1 - X_D/L_H)$  o  $(1 - Y_D/B_H)$ , se debe escoger el valor mayor.

Donde:

- $X_D$ , es la distancia longitudinal entre la abertura y hasta proa o popa, el extremo que se encuentre más cercano.
- $Y_D$ , es la menor distancia transversal hasta la periferia de la embarcación.

Para el proyecto se considera que  $F_1$  equivale a 1 dado que los costados de la bañera se encuentran muy cercanos a la periferia de la embarcación.

$F_1$
1

Tabla 3.26 Determinación del factor  $F_1$ . Fuente: Propia

#### 4.3.2 FACTOR DE TAMAÑO DE LA ABERTURA $F_2$

Es un valor que puede variar entre 0,6 y 1, ambos extremos incluidos. Para su cálculo se debe estimar el valor de  $a$ .

- $a$ , equivale a la combinación de todas las áreas que conforman la abertura, [mm<sup>2</sup>].

Dependiendo de este valor,  $F_2$  se obtiene:

- i) Si  $a \geq (30 L_H)^2$ ,  $F_2 = 1$ .
- ii) Si  $a < (30 L_H)^2$  Mediante ecuación 3.68

$$F_2 = 1 + \frac{X'_D}{L_H} \left( \frac{\sqrt{a}}{75 L_H} - 0,4 \right) \quad (3.68)$$

Donde:

- $X'_D$ , equivale a la distancia longitudinal desde proa hasta a la abertura.

Mediante el uso de *Rhinoceros* se concluye que se debe emplear la expresión 3.68. Estos son los valores resultantes:

VALOR LÍMITE (mm <sup>2</sup> )	$a$ (mm <sup>2</sup> )	$X'_D$ (m)	$F_2$
33524100	2485156,3	3,58	0,755

Tabla 3. 27 Determinación del factor  $F_2$ . Fuente: Propia



### 4.3.3 FACTOR DE TAMAÑO DEL NICHOS, $F_3$

Este factor ha de oscilar entre 0,7 y 1,2, ambos valores incluidos. Se puede calcular de tres modos distintos:

- i) Si a abertura no es un nicho,  $F_3 = 1$ .
- ii) Si el nicho es de achique rápido,  $F_3 = 0,7$ .
- iii) Si el nicho no es de achique rápido:

$$F_3 = 0,7 + k^{1/2} \quad (3.69)$$

Donde:

$$k = \frac{V_R}{L_H B_H F_M} \quad (3.70)$$

- $V_R$ , volumen de los nichos,  $[m^3]$ .
- $F_M$ , franco bordo en la mitad de la eslora en la condición de carga,  $[m]$ .

Se aplica el tercer método dado que no se ha reparado atención a la naturaleza del nicho. Se obtiene que:

FACTOR DE TAMAÑO DEL NICHOS $F_3$	
<b>SUPERFICIE BAÑERA (<math>m^2</math>)</b>	2,19
<b>ALTURA BAÑERA (m)</b>	0,5
<b><math>V_R</math> (<math>m^3</math>)</b>	1,095
<b><math>F_M</math> (m)</b>	0,71
<b><math>B_H</math> (m)</b>	1,634
<b><math>L_H</math> (m)</b>	5,79
<b><math>F_3</math></b>	1,103

Tabla 3.28 Determinación del factor  $F_3$ . Fuente: Propia

#### 4.3.4 FACTOR DE DESPLAZAMIENTO $F_4$

Frecuentemente se encuentra entre 0,7 y 1,1. Su determinación:

$$F_4 = \left( \frac{10 V_D}{L_H B^2} \right)^{1/3} \quad (3.71)$$

Donde:

- $V_D$ , es el volumen de desplazamiento en máxima carga, [m<sup>3</sup>].
- $B$ , es  $B_H$  para los monocascos y  $B_{WL}$  para los catamaranes, [m].

FACTOR DE TAMAÑO DEL NICHOS $F_4$	
$V_D$ (m <sup>3</sup> )	1,001
$B_H$ (m)	1,634
$F_4$	0,865

Tabla 3.29 Determinación del factor  $F_4$ . Fuente: Propia

#### 4.3.5 FACTOR DE FLOTACIÓN $F_5$

Depende exclusivamente del método de evaluación de la estabilidad empleado:

- 0,8 Para las embarcaciones que usen las opciones 1 y 3.
- 0,9 para las que utilicen la opción 6.
- 1 para las que utilicen las opciones 2 y 5.
- 1,25 para las que utilicen la opción 4.

$F_5$
1,25

Tabla 3.30 Determinación del factor  $F_5$ . Fuente: Propia

#### 4.3.6 ALTURA DE INUNDACIÓN REQUERIDA

Estimados todos los factores, se aplica la expresión 3.67 para el cálculo de la altura de inundación requerida  $h_D$ :

$$h_d = 0,386 \times 1 \times 0,755 \times 1,103 \times 0,865 \times 1,25 = 0,347 \text{ m} \quad (3.67)$$

El último paso consiste en comparar el valor  $h_D$  con los que se encuentran en la siguiente tabla y determinar a qué categoría de diseño puede pertenecer la embarcación:

PRÁMETRO	CATEGORÍA DE DISEÑO		
	C	D	D
OPCIONES	1-4,6	1-4,6	5
$h_D \text{ (m)} \geq$	0,3	0,2	0,4
$h_D \text{ (m)} \leq$	0,75	0,4	-

Tabla 3.31 Determinación de la categoría de diseño en función de la altura de inundación. Fuente. ISO 12217-3:2017

Por lo tanto, se puede asegurar que con el método empleado la motora puede pertenecer a la categoría C. Seguidamente se debe comprobar que también cumple los requisitos del ensayo de compensación de carga.

#### 4.4 ENSAYO DE COMPENSACIÓN DE CARGA

Este procedimiento tiene como finalidad corroborar que una embarcación dispone de cierta estabilidad cuando se reubican las cargas. Para su realización se deben respetar los siguientes puntos:

- El ensayo debe llevarse a cabo con el mar en calma.
- Se pueden utilizar personas en lugar de cargas siempre y cuando sean de mayor o igual peso.
- El ensayo debe realizar en condición de máxima carga salvo en algunas excepciones (consultar normativa ISO 12217-3:2017).
- Se debe hacer escorar la embarcación hacia el costado que muestre una situación más desfavorable.
- Durante la realización del ensayo también se debe proceder a medir el franco bordo de la embarcación.

Para la realización de este apartado es necesario el empleo del software *Maxsurf Stability*. Simultáneamente se ha hecho una breve distribución de pesos para una localización aproximada del centro de gravedad de la motora en condición de máxima carga.

Se ha establecido como origen de coordenadas la parte más baja del espejo de popa. El eje de abscisas está ubicado en el sentido longitudinal de la embarcación. Al mismo tiempo el eje Y y Z recogen la posición transversal y la altura de los pesos respectivamente. Finalmente, aclarar que la tabla no recoge la totalidad de los pesos que conforman una embarcación. La tabla 3.32 recopila la distribución de pesos en condición de máxima carga:

ÍTEM	Distribuidor	PESO (kg)	UBICACIÓN			Momento (kg·m)		
			X (m)	Y (m)	Z (m)	M <sub>l</sub> (kg·m)	M <sub>t</sub> (kg·m)	M <sub>v</sub> (kg·m)
ZONA DE BAÑERA								
Mesa	Nuova Rade	15,00	0,89	0,00	0,75	13,37	0,00	11,27
Pie de mesa	IMNASA	7,00	0,89	0,00	0,57	6,24	0,00	4,00
Puesto de mando	Propia (Molde)	11,42	1,90	-0,40	0,93	21,71	-4,56	10,62
Rueda de timón	IMNASA	14,00	1,61	-0,39	0,74	22,51	-5,52	10,32
ZONA DE CABINA								
Nevera	DOMETIC	47,00	2,26	-0,53	0,47	106,41	-24,77	22,14
Calentador de agua 40 L (Lleno)	Isotemp	59,00	2,19	0,57	1,04	128,92	33,63	61,60
Microondas	Bosch	13,00	2,23	-0,60	1,53	28,95	-7,75	19,89
Lavabo	FORESTI & SUARDI	8,00	2,65	0,62	0,75	21,19	4,98	6,03
Retrete LT-0	Nuova Rade	16,00	2,27	0,51	0,51	36,35	8,22	8,11
Vitrocerámica Serie 4	Bosch	11,00	2,68	-0,53	0,87	29,52	-5,82	9,52
Fregadero Cocina LR1760	Can	7,00	3,05	0,52	0,79	21,32	3,65	5,54

Armario Babor	ND (Estimado)	18,00	3,61	-0,52	0,87	65,03	-9,41	15,59
Armario Estribor	ND (Estimado)	18,00	3,61	0,52	0,87	65,03	9,41	15,59
<b>ESCANTILLONADO</b>								
Escantillonado Casco Costado	Propia (Molde)	46,51	2,82	0,00	0,59	131,16	0,00	27,44
Escantillonado Casco Fondo	Propia (Molde)	34,58	2,11	0,00	0,12	72,96	0,00	4,05
Escantillonado cabina	Propia (Molde)	40,38	3,03	0,00	1,40	122,19	0,00	56,53
<b>TANQUES</b>								
Tanque combustible SOGLIOLA 44834 45 L (Lleno)	Nuova Rade	34,30	0,69	0,24	0,26	23,50	8,23	8,95
Tanque agua dulce SOLGLIOLA 50216 80 L (Lleno)	Nuova Rade	80,00	0,90	-0,26	0,31	71,76	-20,96	25,12
Tanque de aguas grises/negras BLIZZARD 60 L 196868 (Lleno)	Nuova Rade	60,00	1,45	0,22	0,70	87,24	13,44	41,94
<b>EQUIPO DE FONDEO</b>								
Ancla arado 37849	Dis marina	15,00	5,42	0,00	0,90	81,35	0,00	13,47
Cadena 50 m 16501 (1,4kg/m)	Dis marina	70,00	5,42	0,00	1,00	379,61	0,00	69,86
Molinete 700 W 63516	Dis marina	7,00	5,10	0,00	1,36	35,67	0,00	9,49
<b>EQUIPO PROPULSOR</b>								
E-TEC 60 CV	Evinrude	109,00	-0,36	0,00	0,98	-38,70	0,00	106,28

PASAJE Y PERTENENCIAS								
Pasaje (3 Pasajeros, 75 kg/PAX)	ISO 12217	255,00	1,41	0,00	0,90	359,04	0,00	230,27
Efectos personales (20 kg/PAX, BABOR)	ISO 12217	30,00	3,61	-0,52	0,87	108,39	-15,69	25,98
Efectos personales (20 kg/PAX, ESTRIBOR)	ISO 12217	30,00	3,61	0,52	0,87	108,39	15,69	25,98

Tabla 3.32 Distribución de pesos en condición de máxima carga. Fuente: Propia

A partir de esta tabla se extrae la ubicación aproximada del centro de gravedad de la embarcación:

UBICACIÓN DEL CENTRO DE GRAVEDAD						
$\Delta$ (kg)	$\sum M_l$ (kg · m)	$\sum M_t$ (kg · m)	$\sum M_v$ (kg · m)	LG (m)	tG (m)	KG (m)
1026,19	2109,11	2,78	845,56	2	0	0,80

Tabla 3.33 Determinación del centro de gravedad. Fuente: Propia

Observando los resultados de la tabla parece que la distribución de pesos de la motora es idónea. A primera vista presenta un buen comportamiento transversal. Esto es fruto de un reparto simétrico de las distintas cargas a bordo. También porque grandes pesos tales como el motor fueraborda o el pasaje han sido ubicados sobre la línea de crujía.

Finalizada esta primera aproximación del centro de gravedad se vuelve al tema principal de este punto, el ensayo de compensación de carga. Acto seguido, se resumen los principales puntos para aplicar este ensayo:

- i) En condición de máxima carga se distribuyen los pesos (personas) a un costado de la zona de tripulación, salvaguardando un margen de 200 mm con respecto a límite exterior de esta zona.

- ii) Se debe efectuar para diferentes posiciones, también variando la posición longitudinal.
- iii) Se ha de respetar una distancia mínima de 500 mm entre los distintos pesos.
- iv) Medición del ángulo de escora. Este valor se obtiene gracias a la simulación de *Maxsurf Stability*.
- v) Medición del franco bordo para la situación de escora.
- vi) Comparación de los valores con los máximos establecidos por normativa.

#### 4.4.1 APLICACIÓN DE MAXSURF STABILITY

El uso de *Maxsurf Stability* permite recrear la situación real de carga de manera muy precisa. Este apartado consiste en introducir los pesos recogidos en la figura 3.16 y compararlos con los valores máximos. Tras modificar varias veces la ubicación de la tripulación se da que la situación más desfavorable es la siguiente:

	Item Name	Quantity	Unit Mass kg	Total Mass kg	Unit Volume m³	Total Volume m³	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m
1	Mesa	1	15,0	15,0			0,891	0,000	0,751
2	Pie de mesa	1	7,0	7,0			0,891	0,000	0,572
3	Puesto de man	1	11,4	11,4			1,900	-0,399	0,930
4	Rueda de timón	1	14,0	14,0			1,608	-0,394	0,737
5	Nevera	1	47,0	47,0			2,264	-0,527	0,471
6	Calentador de	1	59,0	59,0			2,185	0,570	1,044
7	Microondas	1	13,0	13,0			2,227	-0,596	1,530
8	Lavabo	1	8,0	8,0			2,649	0,622	0,754
9	Retrete	1	16,0	16,0			2,272	0,514	0,507
10	Vitrocámica	1	11,0	11,0			2,684	-0,529	0,865
11	Fregadero	1	7,0	7,0			3,046	0,521	0,792
12	Aramario Babo	1	18,0	18,0			3,613	-0,523	0,866
13	Armario Estribo	1	18,0	18,0			3,613	0,523	0,866
14	Escantillonado	1	46,5	46,5			2,820	0,000	0,590
15	Escantillonado	1	34,6	34,6			2,110	0,000	0,117
16	Escantillonado	1	40,4	40,4			3,026	0,000	1,400
17	Tanque combu	1	34,3	34,3			0,685	0,240	0,261
18	Tanque agua d	1	80,0	80,0			0,897	-0,262	0,314
19	Tanque aguas	1	60,0	60,0			1,454	0,224	0,699
20	Ancla arado	1	15,0	15,0			5,423	0,000	0,898
21	Cadena	1	70,0	70,0			5,423	0,000	0,998
22	Molinete	1	7,0	7,0			5,096	0,000	1,356
23	Motor fuerabor	1	109,0	109,0			-0,355	0,000	0,975
24	Tripulante 1	1	75,0	75,0			0,992	-0,445	0,700
25	Tripulante 2	1	75,0	75,0			1,318	-0,623	0,700
26	Tripulante 3	1	75,0	75,0			1,589	-0,489	0,700
27	Pertenencias Bab	1	30,0	30,0			3,613	-0,523	0,866
28	Pertenencias E	1	30,0	30,0			3,613	0,523	0,866
29	Total Loadca			1026,2	0,000	0,000	1,990	-0,111	0,753

Figura 3.16 Introducción de los pesos en Maxsurf Stability. Fuente: Propia

Para esta distribución de pesos la motora presenta esta estabilidad:

1	Draft Amidships m	0,242
2	Displacement kg	1026
3	Heel deg	-10,6
4	Draft at FP m	0,198
5	Draft at AP m	0,287
6	Draft at LCF m	0,251
7	Trim (+ve by stern)	0,090
8	WL Length m	5,303
9	Beam max extents	1,523
10	Wetted Area m^2	7,038
11	Waterpl. Area m^2	6,195
12	Prismatic coeff. (Cp)	0,696
13	Block coeff. (Cb)	0,473
14	Max Sect. area coe	0,758
15	Waterpl. area coeff.	0,767
16	LCB from zero pt. (	1,981
17	LCF from zero pt. (+	2,137
18	KB m	0,195
19	KG fluid m	0,753
20	BMT m	0,985
21	BML m	10,429
22	GMt corrected m	0,417
23	GML m	9,861
24	KMt m	1,163
25	KML m	10,445
26	Immersion (TPc) ton	0,063
27	MTc tonne.m	0,019
28	RM at 1deg = GMT.D	7,465
29	Max deck inclination	10,620
30	Trim angle (+ve by	0,9688

Figura 3.17 Estabilidad de la motora. Fuente: Propia

*Maxsurf Stability* determina un ángulo de escora para esta situación de -10,6°. Alcanzado este punto solo resta determinar cuál es el ángulo máximo que permite la normativa. Para ello se hace servir la ecuación 3.72:

$$\Phi_D = 11,5 + \frac{(24 - L_H)^3}{520} [^\circ] \quad (3.72)$$

Comparando los ambos valores se concluye que el ángulo de escora producido por la situación de carga se encuentra dentro del rango permitido por la norma.

$\Phi_D [^\circ]$	$\Phi [^\circ]$
23,11	-10,6

Tabla 3.34 Comparación de los ángulos de escora permitido. Fuente: Propia



En cuanto al franco bordo, se recrean la escora y el calado en el programa *Rhinoceros* para poder proceder a su medición.

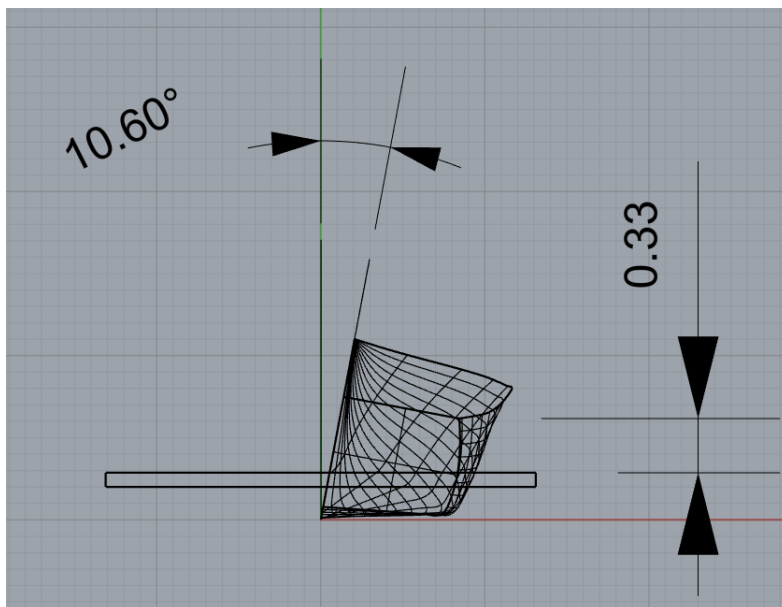


Figura 3.18 Medición del franco bordo en situación de máxima carga. Fuente: Propia

La ISO 12217-3:2017 dictamina estos márgenes de franco bordo para cada categoría de diseño y método empleado. Los valores mínimos de franco bordo se recogen la tabla 3.35:

OPCIÓN	1 (mm)	2 (mm)	3 (mm)	4 (mm)	5 (mm)	6 (mm)
<b>Categoría C</b>	100	100	-	150	-	100
<b>Categoría D</b>	10	10	-	10	170	10

Tabla 3.35 Márgenes mínimos de franco bordo. Fuente: ISO 12217-3:2017

*Nuevamente se vuelve a corroborar que la motora está modelada de forma que pueda alcanzar la categoría de diseño C. Por lo tanto, se puede dar por satisfactorio la clasificación de la embarcación, dado que únicamente optaba a las categorías de diseño C y D. Curiosamente este dato concuerda con la idea propuesta en el apartado 4 del proyecto, en la que se hace una aproximación de la categoría de diseño teniendo en cuenta exclusivamente las dimensiones y los títulos de navegación.*



## CONCLUSIONES

Mediante la elaboración de este proyecto se da por alcanzado uno de los objetivos esenciales propuestos inicialmente, introducir al lector en el campo de los plásticos reforzados. En él queda evidenciado porqué las matrices de poliéster y el refuerzo de fibra de vidrio conforman la combinación de materiales más consolidada en la náutica de recreo. La relación de sus propiedades mecánicas con respecto a un bajo coste económico es la razón principal por la que el uso de refuerzos y matrices con mejores propiedades tales como la fibra de carbono y resinas epoxi se ven relegadas a un segundo plano, reservándose su empleo para situaciones singulares.

La combinación de ambos para la realización de laminados garantiza piezas de altas prestaciones. No obstante, el precio de comercialización es notablemente superior al resto de refuerzos y matrices. Con la realización del trabajo se deduce que este alto coste es consecuencia de dos factores principales. El primero está asociado con el procesado al que se debe someter el material precursor de la fibra de carbono, el cual requiere de una gran aportación energética y por lo tanto de la infraestructura adecuada. A su vez, las piezas de fibra de carbono muestran un coste indirecto asociado a la necesidad por parte del astillero de contar con personal cualificado y de una maquinaria determinada. Esto se debe a que las matrices epoxi presentan un menor tiempo de gel y requieren de aportación de calor para curar completamente.

Dejando de lado la materia relacionada con los *composites*, el segundo bloque del proyecto se inicia con la elección de una embarcación que sea fácilmente accesible en términos de la titulación náutica requerida y el número de inspecciones a las que deberá someterse el modelo. En esta ocasión, el número de potenciales usuarios se ve incrementado si la embarcación presenta una eslora inferior a 6 metros, ya que de este modo el propietario únicamente deberá someterla a una inspección inicial. Realizada una primera acotación, se deduce que el modelo a escoger será accesible únicamente con la licencia de navegación. No obstante, el trabajo se decanta por la elección de la titulación de patrón para la navegación básica para dotar a la motora de mayor libertad, pudiendo alcanzar así las 5 millas náuticas siempre y cuando pertenezca a la categoría de diseño C.

Con las limitaciones descritas se ha escogido un plano de formas perteneciente a una motora de 5,8 metros de eslora. Con el diseño de este modelo queda reflejado que el propósito de aprender a emplear software de diseño queda totalmente consolidado. El proyecto incorpora

un manual donde se detallan los pasos a seguir para la construcción de las distintas zonas de una embarcación.

En relación con el bloque final, su elaboración ha sido la más compleja. En él se recogen temas relacionados con la resistencia al avance, el escantillonado y la estabilidad de la motora. Los dos últimos argumentados mediante la aplicación de normativa ISO, la cual es de alta complejidad en ciertas ocasiones. Aun así, se demuestra que la motora puede pertenecer a la categoría de diseño C tal y como se comentó con anterioridad.

Referente al cálculo de la resistencia al avance, se ha efectuado de dos formas distintas: a través una hoja de cálculo y mediante el empleo de *Maxsurf Resistance*. Destacar la importancia de los programas de CFD, ya que con solo la introducción de algunos parámetros permiten obtener resultados de elevada precisión de manera casi instantánea.

Para finalizar, indicar que una futura línea de investigación interesante sería dar forma al casco de la motora proyectada. Es decir, sacar partido del manual de diseño desarrollado y tratar de diseñar el molde mediante piezas mecanizadas partir de máquinas de corte de control numérico. Posteriormente, realizar el laminado empleando distintos materiales y técnicas de laminado para llevar a cabo una comparación final.

## BIBLIOGRAFÍA

AENOR. *Pequeñas embarcaciones. Construcción de cascos y escantillones. Parte 5: Presiones de diseño, tensiones de diseño y determinación del escantillón*. UNE-EN ISO 12215:2008. Madrid: AENOR, 2008.

AENOR. *Pequeñas embarcaciones. Evaluación y clasificación de la estabilidad y la flotabilidad. Parte 3: Embarcaciones de eslora inferior a 6 m*. UNE-EN-ISO 12217-3. Madrid: AENOR, 2015.

AENOR. *Pequeñas embarcaciones. Determinación de la potencia nominal máxima de propulsión utilizando la velocidad de maniobra. Parte 1: Embarcaciones de recreo de eslora menor de 8 m*. UNE-EN-ISO 11592-1. Madrid: AENOR, 2016.

AENOR. *Pequeñas embarcaciones. Construcción de cascos y escantillones. Parte 5: Presiones de diseño, tensiones de diseño y determinación del escantillón*. UNE-EN ISO 12215-5. Madrid: AENOR, 2018.

AENOR. *Pequeñas embarcaciones. Bañeras estancas y bañeras de vaciado rápido*. UNE-EN-ISO 11812. Madrid: AENOR, 2019.

Ahadme, H. Trabajo Final de Grado: Estudio y Diseño de una Embarcación de 18,5 metros de Eslora. [en línea]. [Consulta febrero 2019]. Disponible en <<https://upcommons.upc.edu>>.

Ardanuy, M.; Parés, F. Innovaciones en fibras y estructuras textiles para el refuerzo de materiales compuestos. *Revista de Química e Industria Textil*, 2010, núm. 198, p. 28-35.

Barrass, C. B.; Derret, D. R. *Ship stability for masters and mates*. 7th ed. Oxford: Elsevier, 2013. ISBN 978-0-08-097093-6.

Besednjak, A. *Materiales compuestos: Procesos de fabricación de embarcaciones*. 1ª ed. Barcelona: Edicions UPC, 2005. ISBN 8483018209.

Centro Español de Plásticos. Fibra corta monocristal-Whisker; Vibrissae-Trichite. [en línea]. [Consulta mayo 2019]. Disponible en <<https://cep-plasticos.com/es/contenido/fibra-corta-monocristal-whisker-vibrissae-trichite>>.

Da Costa, C. E.; Velasco, F.; Torralba, J. M. Materiales compuestos de matriz metálica. I Parte. Tipos, propiedades, aplicaciones. *Revista de metalurgia*, 2000, p. 179-192.

Derek, H. *Materiales Compuestos*. 1ª ed. Barcelona: Reverté S. A., 2019. ISBN 8429148396.

Dismarina Mediterranea SL. Ancla arado. [en línea]. [Consulta agosto 2019]. Disponible en <<http://www.dismarina.com/>>.

Dometic. Nevera. [en línea]. [Consulta agosto 2019]. Disponible en <<https://www.dometic.com/es-es/es/ayuda/cat%C3%A1logos>>.

EcuRed. Material Compuesto. [en línea]. [Consulta marzo 2019]. Disponible en <[https://www.ecured.cu/Material\\_compuesto](https://www.ecured.cu/Material_compuesto)>.

Evinrude. Informes de rendimiento. [en línea]. [Consulta julio 2019]. Disponible en <<https://www.evinrude.com/es-ES/performance-reports.html>>.

Fernández, P.; Martínez, V.; Valencia, M.; Cruz, J. Aplicaciones de los materiales compuestos de matriz metálica en el sector eléctrico. *DYNA*, 2006, p. 131-140.

Forseti & Suardi. Lavabo. [en línea]. [Consulta agosto 2019]. Disponible en <<http://www.forestiesuardi.it/>>.

Gil, A. Resinas de poliéster. Guía de manejo. [en línea]. [Consulta marzo 2019]. Disponible en <<http://www.eafit.edu.co/servicios/centrodelaboratorios/infraestructura/laboratorios/Docum ents/Guia%20de%20manejo%20de%20resinas.pdf>>.

González, J.L. *Materiales compuestos: tecnología de los plásticos reforzados*. 4ª ed. Madrid: Fondo Editorial de Ingeniería Naval, 1995. ISBN 8460420299.

Imnasa. Rueda de Timón. [en línea]. [Consulta agosto 2019]. Disponible en <<https://www.imnasa.es/es/marine-products.html>>.

Isotemp Water Heaters. Calentador de agua 40L. [en línea]. [Consulta agosto 2019]. Disponible en <<https://www.indelwebastomarine.com/int/products/isotemp-water-heaters/>>.

Jiménez, M. A.; Castejón, L.; Miravete, A. Materiales compuestos realizados a partir de nuevas tecnologías textiles. *Materiales de construcción*, 1997, p. 83-91.

Larsson, L.; Eliasson, R. E. *Principles of yachts design*. 2ª ed. Londres: Adlard Coles Nautical, 2000. ISBN 0713651814.

McNeel, R., *Rhinoceros: Herramientas de modelado para diseñadores*.

Mel composites. Productos. [en línea]. [Consulta marzo 2019]. Disponible en <<https://melcomposites.es/productos/>>.

Mexpolímeros. Tg Temperatura de Transición vítrea. [en línea]. [Consulta junio 2019]. Disponible en <<https://www.mexpolimeros.com/tg.html>>.

Miravete, A.; et al. *Materiales compuestos I*. e-book ed. Barcelona: Reverté S. A., 2007. ISBN 9788429192247.

Miravete, A.; et al. *Materiales compuestos II*. e-book ed. Barcelona: Reverté S. A., 2012. ISBN 9788429192612.

Naval Composites. Conceptos de los materiales compuestos. [en línea]. [Consulta marzo 2019]. Disponible en <<https://www.navalcomposites.com/materiales-compuestos>>.

Navarro, A. Trabajo final de máster: Influencia del ciclo de curado en las características a cizalladura de composites de alto gramaje con resinas vinil-uretano. [en línea]. [Consulta julio 2019]. Disponible en <[https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/29959/07\\_TESIS.pdf?sequence=1](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/29959/07_TESIS.pdf?sequence=1)>.

Nuova Rade. Tanques. [en línea]. [Consulta agosto 2019]. Disponible en <<https://www.nuovarade.com/>>.

Open Course Ware. Tema 7: materiales compuestos de matriz metálica. [en línea]. [Consulta mayo 2019]. Disponible en

<[https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/7038/mod\\_resource/content/1/materia\\_comp/tema-7-materiales-compuestos-de-matriz-metalica.pdf](https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/7038/mod_resource/content/1/materia_comp/tema-7-materiales-compuestos-de-matriz-metalica.pdf)>.

Ramírez, F. y Ruiz, J. J. Materiales compuestos de matriz metálica. [en línea]. [Consulta junio 2019]. Disponible en <<https://es.scribd.com/doc/51659548/Materiales-compuestos-de-matriz-metalica>>.

Rhinoceros. Modelador NURBS para Windows. [en línea]. [Consulta febrero 2019]. Disponible en <<https://www.mundomanuales.com/manuales/4879.pdf>>.

Sánchez, D. Proyecto Final de Carrera: Diseño de un velero de concepto crucero-regata de 31 pies. [en línea]. [Consulta febrero 2019]. Disponible en <<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/21225/PFC.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>.

Smith, F. M.; Hashemi, J. *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. 4ª ed. México D.F.: Mc Graw Hill Interamericana Editores, S.A., 2006. ISBN 9701056388.

Sintemar. Instalación de motores y equipos con resinas epoxi. [en línea]. [Consulta abril 2019]. Disponible en <[http://www.sintemar.com/sites/default/files/ca\\_sintemar\\_es\\_instalacion\\_de\\_motores\\_y EQUIPOSnaval\\_y\\_offshore\\_2.pdf](http://www.sintemar.com/sites/default/files/ca_sintemar_es_instalacion_de_motores_y EQUIPOSnaval_y_offshore_2.pdf)>.

Textos Científicos. Temperatura de transición vítrea. [en línea]. [consulta junio 2019]. Disponible en <<https://www.textoscientificos.com/polimeros/temperatura>>.

Universidad de Valladolid. Tema 7: Materiales Compuestos. [en línea]. [Consulta marzo 2019]. Disponible en <[https://alojamientos.uva.es/guia\\_docente/uploads/2013/469/45757/1/Documento29.pdf](https://alojamientos.uva.es/guia_docente/uploads/2013/469/45757/1/Documento29.pdf)>.

White, F. M. *Mecánica de fluidos*. 6ª ed. Madrid: Mc Graw Hill Interamericana de España, S.A.U., 2008. ISBN 9788448166038.

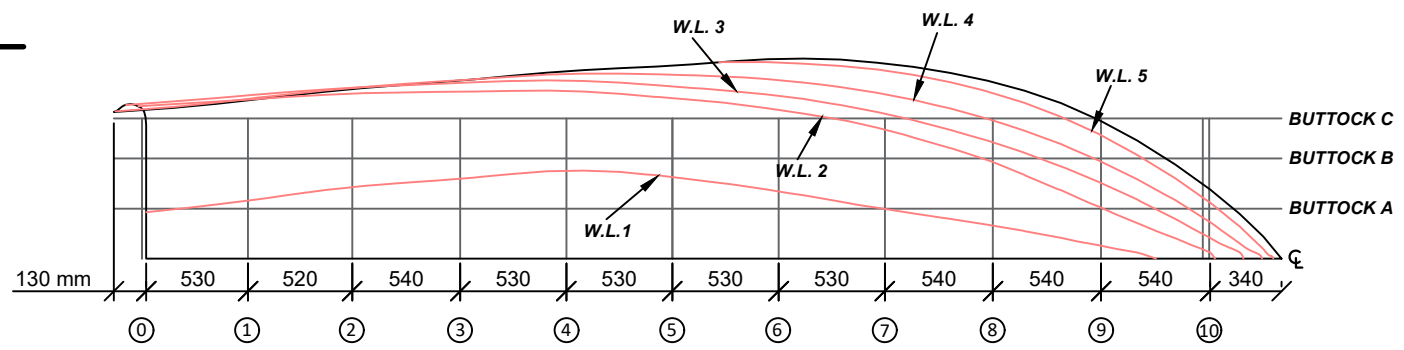
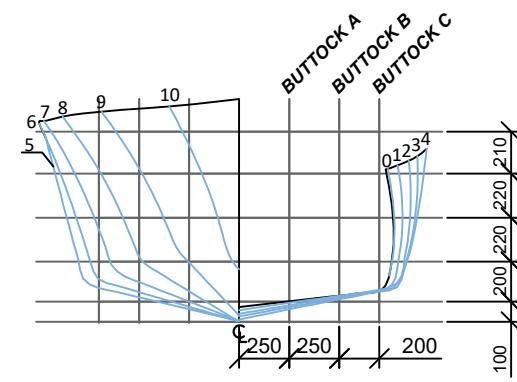
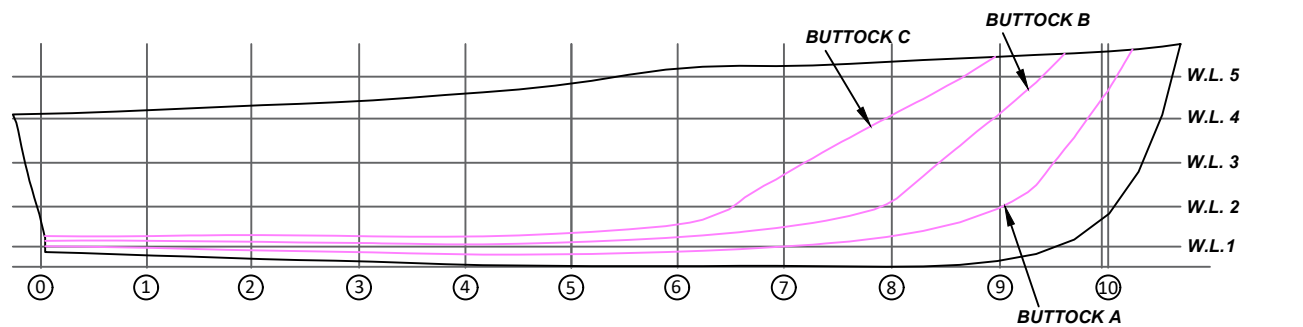




# ANEXOS

# ANEXO I PLANO DE FORMAS

1 2 3 4 5 6



MOTORA CABALLERO	
Eslora flotación LWL (m)	5,287
Manga (m)	1,634
Calado (m)	0,23
Desplazamiento (kg)	830,3
Coficiente de bloque	0,409
Coficiente prismático	0,689
Superficie mojada (m2)	7,169
Área del pano de flotación (m2)	6,62

Departamento responsable Dept. Tecnología Naval	Referencia técnica ISO 12215	Tipo de documento Plano de formas		Estado de documento Editado		
Propietario legal Luis Soto	Creado por: Luis Soto	Título, Título suplementario Motora Caballero				
	Aprobado por: Dept. Tecn. Naval			Rev. 4	Fecha de edición 20/07/2019	Idioma ESP
				Hoja 1		

# ANEXO II

# DISTRIBUCIÓN DE

# PANELES

1	2	3	4																																																																																																																																																													
				A																																																																																																																																																												
<div><div><div><div><div>A<sub>4</sub></div><div>B<sub>4</sub></div><div>C<sub>4</sub></div><div>D<sub>4</sub></div><div>E<sub>4</sub></div><div>F<sub>4</sub></div><div>G<sub>4</sub></div><div>G<sub>5</sub></div><div>H<sub>4</sub></div><div>H<sub>5</sub></div></div><div><div>A<sub>3</sub></div><div>B<sub>3</sub></div><div>C<sub>3</sub></div><div>D<sub>3</sub></div><div>E<sub>3</sub></div><div>F<sub>3</sub></div><div>G<sub>2</sub></div><div>G<sub>3</sub></div><div>H<sub>2</sub></div><div>H<sub>3</sub></div></div></div></div></div>				B																																																																																																																																																												
				C																																																																																																																																																												
<div><div><div><div><div>A<sub>2</sub></div><div>B<sub>2</sub></div><div>C<sub>2</sub></div><div>D<sub>2</sub></div><div>E<sub>2</sub></div><div>F<sub>2</sub></div></div><div><div>A<sub>1</sub></div><div>B<sub>1</sub></div><div>C<sub>1</sub></div><div>D<sub>1</sub></div><div>E<sub>1</sub></div><div>F<sub>1</sub></div></div></div><div><div>G<sub>1</sub></div><div>H<sub>1</sub></div></div></div></div>				D																																																																																																																																																												
				E																																																																																																																																																												
<table><tr><th>PANEL</th><th>l (mm)</th><th>b (mm)</th><th>A<sub>D</sub> (m2)</th><th>PANEL</th><th>l (mm)</th><th>b (mm)</th><th>A<sub>D</sub> (m2)</th><th>PANEL</th><th>l (mm)</th><th>b (mm)</th><th>A<sub>D</sub> (m2)</th></tr><tr><td>A1</td><td>508</td><td>412,75</td><td>0,21</td><td>G1</td><td>1123,95</td><td>457,2</td><td>0,51</td><td>F3</td><td>533,4</td><td>342,9</td><td>0,18</td></tr><tr><td>A2</td><td>533,4</td><td>374,65</td><td>0,20</td><td>H1</td><td>1085,85</td><td>438,15</td><td>0,48</td><td>F4</td><td>539,75</td><td>368,3</td><td>0,20</td></tr><tr><td>B1</td><td>520,7</td><td>412,75</td><td>0,21</td><td>A3</td><td>615,95</td><td>342,9</td><td>0,21</td><td>G2</td><td>546,1</td><td>349,25</td><td>0,19</td></tr><tr><td>B2</td><td>520,7</td><td>412,75</td><td>0,21</td><td>A4</td><td>647,7</td><td>260,35</td><td>0,17</td><td>G3</td><td>546,1</td><td>381</td><td>0,21</td></tr><tr><td>C1</td><td>539,75</td><td>419,1</td><td>0,23</td><td>B3</td><td>520,7</td><td>336,55</td><td>0,18</td><td>G4</td><td>539,75</td><td>463,55</td><td>0,25</td></tr><tr><td>C2</td><td>539,75</td><td>431,8</td><td>0,23</td><td>B4</td><td>527,05</td><td>222,25</td><td>0,12</td><td>G5</td><td>539,75</td><td>501,65</td><td>0,27</td></tr><tr><td>D1</td><td>527,05</td><td>419,1</td><td>0,22</td><td>C3</td><td>539,75</td><td>342,9</td><td>0,19</td><td>H2</td><td>577,85</td><td>419,1</td><td>0,24</td></tr><tr><td>D2</td><td>527,05</td><td>444,5</td><td>0,23</td><td>C4</td><td>539,75</td><td>241,3</td><td>0,13</td><td>H3</td><td>831,85</td><td>393,7</td><td>0,33</td></tr><tr><td>E1</td><td>533,4</td><td>419,1</td><td>0,22</td><td>D3</td><td>527,05</td><td>342,9</td><td>0,18</td><td>H4</td><td>577,85</td><td>546,1</td><td>0,32</td></tr><tr><td>E2</td><td>533,4</td><td>406,4</td><td>0,22</td><td>D4</td><td>533,4</td><td>266,7</td><td>0,14</td><td>H5</td><td>1123,95</td><td>571,5</td><td>0,64</td></tr><tr><td>F1</td><td>533,4</td><td>425,45</td><td>0,23</td><td>E3</td><td>533,4</td><td>342,9</td><td>0,18</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr><tr><td>F2</td><td>539,75</td><td>330,2</td><td>0,18</td><td>E4</td><td>533,4</td><td>311,15</td><td>0,17</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr></table>				PANEL	l (mm)	b (mm)	A <sub>D</sub> (m2)	PANEL	l (mm)	b (mm)	A <sub>D</sub> (m2)	PANEL	l (mm)	b (mm)	A <sub>D</sub> (m2)	A1	508	412,75	0,21	G1	1123,95	457,2	0,51	F3	533,4	342,9	0,18	A2	533,4	374,65	0,20	H1	1085,85	438,15	0,48	F4	539,75	368,3	0,20	B1	520,7	412,75	0,21	A3	615,95	342,9	0,21	G2	546,1	349,25	0,19	B2	520,7	412,75	0,21	A4	647,7	260,35	0,17	G3	546,1	381	0,21	C1	539,75	419,1	0,23	B3	520,7	336,55	0,18	G4	539,75	463,55	0,25	C2	539,75	431,8	0,23	B4	527,05	222,25	0,12	G5	539,75	501,65	0,27	D1	527,05	419,1	0,22	C3	539,75	342,9	0,19	H2	577,85	419,1	0,24	D2	527,05	444,5	0,23	C4	539,75	241,3	0,13	H3	831,85	393,7	0,33	E1	533,4	419,1	0,22	D3	527,05	342,9	0,18	H4	577,85	546,1	0,32	E2	533,4	406,4	0,22	D4	533,4	266,7	0,14	H5	1123,95	571,5	0,64	F1	533,4	425,45	0,23	E3	533,4	342,9	0,18	-	-	-	-	F2	539,75	330,2	0,18	E4	533,4	311,15	0,17	-	-	-	-	F
PANEL	l (mm)	b (mm)	A <sub>D</sub> (m2)	PANEL	l (mm)	b (mm)	A <sub>D</sub> (m2)	PANEL	l (mm)	b (mm)	A <sub>D</sub> (m2)																																																																																																																																																					
A1	508	412,75	0,21	G1	1123,95	457,2	0,51	F3	533,4	342,9	0,18																																																																																																																																																					
A2	533,4	374,65	0,20	H1	1085,85	438,15	0,48	F4	539,75	368,3	0,20																																																																																																																																																					
B1	520,7	412,75	0,21	A3	615,95	342,9	0,21	G2	546,1	349,25	0,19																																																																																																																																																					
B2	520,7	412,75	0,21	A4	647,7	260,35	0,17	G3	546,1	381	0,21																																																																																																																																																					
C1	539,75	419,1	0,23	B3	520,7	336,55	0,18	G4	539,75	463,55	0,25																																																																																																																																																					
C2	539,75	431,8	0,23	B4	527,05	222,25	0,12	G5	539,75	501,65	0,27																																																																																																																																																					
D1	527,05	419,1	0,22	C3	539,75	342,9	0,19	H2	577,85	419,1	0,24																																																																																																																																																					
D2	527,05	444,5	0,23	C4	539,75	241,3	0,13	H3	831,85	393,7	0,33																																																																																																																																																					
E1	533,4	419,1	0,22	D3	527,05	342,9	0,18	H4	577,85	546,1	0,32																																																																																																																																																					
E2	533,4	406,4	0,22	D4	533,4	266,7	0,14	H5	1123,95	571,5	0,64																																																																																																																																																					
F1	533,4	425,45	0,23	E3	533,4	342,9	0,18	-	-	-	-																																																																																																																																																					
F2	539,75	330,2	0,18	E4	533,4	311,15	0,17	-	-	-	-																																																																																																																																																					
<div><div>Departamento responsable Dept. Tecnología Naval</div><div>Referencia técnica ISO 12215</div><div>Tipo de documento Distribución de paneles</div><div>Estado de documento Editado</div></div>																																																																																																																																																																
<div><div>Propietario legal Luis Soto</div><div>Creado por: Luis Soto</div><div>Aprobado por: Dept. Tecn.Naval</div><div>Título, Título suplementario Motora Caballero</div><div><div>Rev. 2</div><div>Fecha de edición 30/07/2019</div><div>Idioma ESP</div><div>Hoja 1</div></div></div>																																																																																																																																																																

# ANEXO III CÁLCULO ESCANTILLONADO

PANEL	UBICACIÓN	CENTRO X (m)	b (mm)	l (mm)	A <sub>D</sub> (m <sup>2</sup> )	VALOR LÍMITE (m <sup>2</sup> )	PLANEEO			DESPLAZAMIENTO		
							k <sub>L</sub>	k <sub>R</sub>	K <sub>AR</sub>	k <sub>L</sub>	k <sub>R</sub>	K <sub>AR</sub>
A1	FONDO	0,28	412,75	508,00	0,21	0,43	0,75	1,00	0,44	0,54	1,38	0,60
A2	FONDO	0,28	374,65	533,40	0,20	0,35	0,75	1,00	0,44	0,54	1,39	0,61
B1	FONDO	0,79	412,75	520,70	0,21	0,43	0,79	1,00	0,43	0,62	1,38	0,59
B2	FONDO	0,80	412,75	520,70	0,21	0,43	0,79	1,00	0,43	0,63	1,38	0,59
C1	FONDO	1,32	419,10	539,75	0,23	0,44	0,84	1,00	0,43	0,71	1,37	0,58
C2	FONDO	1,32	431,80	539,75	0,23	0,47	0,84	1,00	0,42	0,71	1,37	0,58
D1	FONDO	1,86	419,10	527,05	0,22	0,44	0,88	1,00	0,43	0,79	1,37	0,59
D2	FONDO	1,86	444,50	527,05	0,23	0,49	0,88	1,00	0,42	0,79	1,37	0,58
E1	FONDO	2,39	419,10	533,40	0,22	0,44	0,93	1,00	0,43	0,87	1,37	0,59
E2	FONDO	2,39	406,40	533,40	0,22	0,41	0,93	1,00	0,43	0,87	1,38	0,59
F1	FONDO	2,92	425,45	533,40	0,23	0,45	0,98	1,00	0,42	0,96	1,37	0,58
F2	FONDO	2,91	330,20	539,75	0,18	0,27	0,98	1,00	0,46	0,96	1,40	0,64
G1	FONDO	3,67	457,20	1123,95	0,51	0,52	1,00	1,00	0,33	1,00	1,36	0,45
H1	FONDO	4,63	438,15	1085,85	0,48	0,48	1,00	1,00	0,34	1,00	1,37	0,47
A3	COSTADO	0,25	342,90	615,95	0,21	0,29	0,75	1,00	0,43	0,54	1,40	0,61
A4	COSTADO	0,22	260,35	647,70	0,17	0,17	0,74	1,00	0,46	0,54	1,42	0,66
B3	COSTADO	0,79	336,55	520,70	0,18	0,28	0,79	1,00	0,46	0,62	1,40	0,64
B4	COSTADO	0,80	222,25	527,05	0,12	0,12	0,79	1,00	0,52	0,63	1,43	0,74
C3	COSTADO	1,33	342,90	539,75	0,19	0,29	0,84	1,00	0,45	0,71	1,40	0,63
C4	COSTADO	1,33	241,30	539,75	0,13	0,15	0,84	1,00	0,50	0,71	1,43	0,72
D3	COSTADO	1,86	342,90	527,05	0,18	0,29	0,88	1,00	0,45	0,79	1,40	0,64
D4	COSTADO	1,87	266,70	533,40	0,14	0,18	0,89	1,00	0,49	0,79	1,42	0,69
E3	COSTADO	2,39	342,90	533,40	0,18	0,29	0,93	1,00	0,45	0,87	1,40	0,63
E4	COSTADO	2,40	311,15	533,40	0,17	0,24	0,93	1,00	0,47	0,87	1,41	0,66
F3	COSTADO	2,92	342,90	533,40	0,18	0,29	0,98	1,00	0,45	0,96	1,40	0,63
F4	COSTADO	2,93	368,30	539,75	0,20	0,34	0,98	1,00	0,44	0,96	1,39	0,61
G2	COSTADO	3,46	349,25	546,10	0,19	0,30	1,00	1,00	0,45	1,00	1,40	0,62
G3	COSTADO	3,99	381,00	546,10	0,21	0,36	1,00	1,00	0,44	1,00	1,39	0,60
G4	COSTADO	3,46	463,55	539,75	0,25	0,54	1,00	1,00	0,41	1,00	1,36	0,56
G5	COSTADO	3,99	501,65	539,75	0,27	0,63	1,00	1,00	0,40	1,00	1,35	0,54
H2	COSTADO	4,52	419,10	577,85	0,24	0,44	1,00	1,00	0,42	1,00	1,37	0,57
H3	COSTADO	5,11	393,70	831,85	0,33	0,39	1,00	1,00	0,38	1,00	1,38	0,53
H4	COSTADO	4,53	546,10	577,85	0,32	0,75	1,00	1,00	0,38	1,00	1,34	0,51
H5	COSTADO	5,22	571,50	1123,95	0,64	0,82	1,00	1,00	0,31	1,00	1,33	0,41

PANEL	UBICACIÓN	FACTORES COMUNES PARA AMBAS SITUACIONES							
		Z (m)	h (m)	K <sub>z</sub>	l/b	k <sub>z</sub>	c (mm)	c/b	k <sub>c</sub>
A1	FONDO	-	-	-	1,23	0,39	0,00	0,00	1,00
A2	FONDO	-	-	-	1,42	0,44	50,80	0,14	0,65
B1	FONDO	-	-	-	1,26	0,40	0,00	0,00	1,00
B2	FONDO	-	-	-	1,26	0,40	44,45	0,11	0,74
C1	FONDO	-	-	-	1,29	0,41	0,00	0,00	1,00
C2	FONDO	-	-	-	1,25	0,40	50,80	0,12	0,71
D1	FONDO	-	-	-	1,26	0,40	0,00	0,00	1,00
D2	FONDO	-	-	-	1,19	0,38	50,80	0,11	0,72
E1	FONDO	-	-	-	1,27	0,40	0,00	0,00	1,00
E2	FONDO	-	-	-	1,31	0,41	38,10	0,09	0,79
F1	FONDO	-	-	-	1,25	0,40	0,00	0,00	1,00
F2	FONDO	-	-	-	1,63	0,47	63,50	0,19	0,50
G1	FONDO	-	-	-	2,46	0,50	107,95	0,24	0,50
H1	FONDO	-	-	-	2,48	0,50	127,00	0,29	0,50
A3	COSTADO	0,54	0,17	0,68	1,80	0,49	69,85	0,20	0,50
A4	COSTADO	0,54	0,44	0,19	2,49	0,50	82,55	0,32	0,50
B3	COSTADO	0,57	0,17	0,71	1,55	0,46	44,45	0,13	0,66
B4	COSTADO	0,57	0,45	0,20	2,37	0,50	57,15	0,26	0,50
C3	COSTADO	0,58	0,17	0,72	1,57	0,46	25,40	0,07	0,85
C4	COSTADO	0,58	0,46	0,22	2,24	0,50	44,45	0,18	0,50
D3	COSTADO	0,62	0,17	0,73	1,54	0,46	6,35	0,02	1,00
D4	COSTADO	0,62	0,48	0,23	2,00	0,50	38,10	0,14	0,62
E3	COSTADO	0,66	0,17	0,75	1,56	0,46	31,75	0,09	0,79
E4	COSTADO	0,66	0,50	0,25	1,71	0,48	19,05	0,06	0,90
F3	COSTADO	0,73	0,17	0,77	1,56	0,46	57,15	0,17	0,55
F4	COSTADO	0,73	0,53	0,27	1,47	0,45	25,40	0,07	0,87
G2	COSTADO	0,77	0,17	0,79	1,56	0,46	127,00	0,36	0,50
G3	COSTADO	0,78	0,15	0,80	1,43	0,44	177,80	0,47	0,50
G4	COSTADO	0,77	0,55	0,29	1,16	0,37	76,20	0,16	0,55
G5	COSTADO	0,78	0,57	0,28	1,08	0,34	114,30	0,23	0,50
H2	COSTADO	0,81	0,15	0,81	1,38	0,43	203,20	0,48	0,50
H3	COSTADO	0,84	0,17	0,80	2,11	0,50	304,80	0,77	0,50
H4	COSTADO	0,81	0,58	0,28	1,06	0,33	165,10	0,30	0,50
H5	COSTADO	0,84	0,60	0,28	1,97	0,50	203,20	0,36	0,50



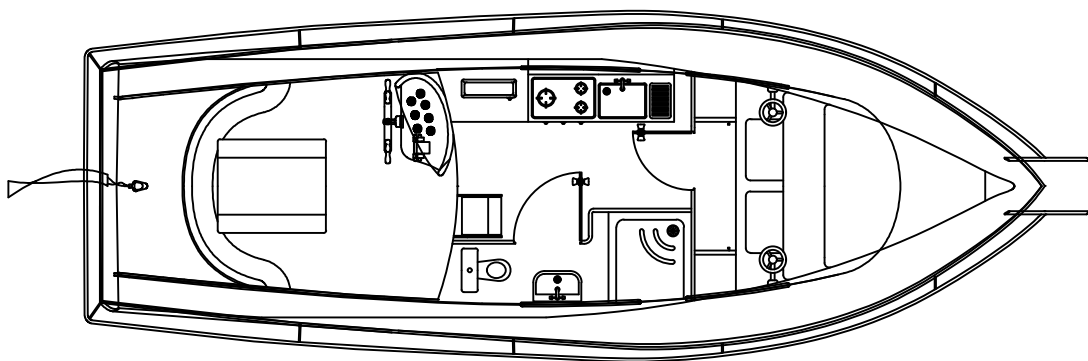
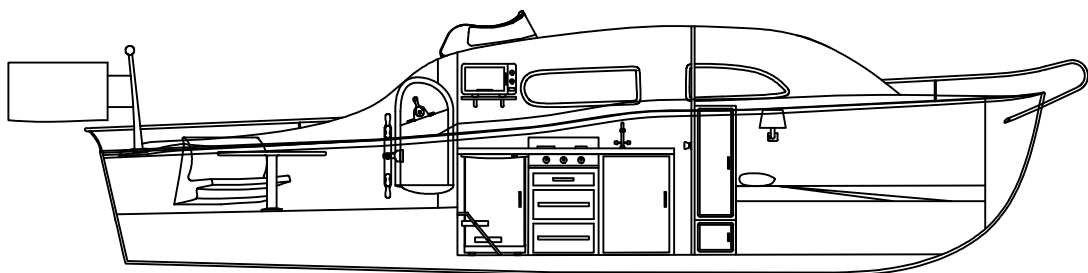
FONDO	DESPLAZAMIENTO		PLANE0			
PANEL	P <sub>BM MÍN</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	P <sub>BMD</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	P <sub>BM MÍN</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	P <sub>BMP</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	P CRÍTCA (kN/m <sup>2</sup> )	ESPESOR MÍNIMO (mm)
A1	6,95	8,17	6,95	13,56	13,56	3,59
A2	6,95	8,35	6,95	13,75	13,75	2,25
B1	6,95	9,29	6,95	14,25	14,25	3,72
B2	6,95	9,30	6,95	14,26	14,26	2,76
C1	6,95	10,35	6,95	14,84	14,84	3,88
C2	6,95	10,23	6,95	14,71	14,71	2,79
D1	6,95	11,65	6,95	15,77	15,77	3,97
D2	6,95	11,38	6,95	15,49	15,49	2,91
E1	6,95	12,82	6,95	16,52	16,52	4,08
E2	6,95	12,98	6,95	16,68	16,68	3,17
F1	6,95	13,96	6,95	17,26	17,26	4,21
F2	6,95	15,30	6,95	18,54	18,54	1,84
G1	6,95	11,34	6,95	13,84	13,84	2,27
H1	6,95	11,66	6,95	14,16	14,16	2,20

COSTADO	DESPLAZAMIENTO		PLANE0			
PANEL	P <sub>SM MÍN</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	P <sub>SMD</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	P <sub>SM MÍN</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	P <sub>SMP</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	P CRÍTCA (kN/m <sup>2</sup> )	ESPESOR MÍNIMO (mm)
A3	2,88	6,62	2,88	2,40	6,62	1,16
A4	2,88	4,51	2,88	3,18	4,51	0,74
B3	2,88	8,27	2,88	2,66	8,27	1,63
B4	2,88	6,01	2,88	3,76	6,01	0,73
C3	2,88	9,27	2,88	2,75	9,27	2,29
C4	2,88	6,69	2,88	3,83	6,69	0,83
D3	2,88	10,55	2,88	2,91	10,55	2,85
D4	2,88	7,32	2,88	3,92	7,32	1,20
E3	2,88	11,75	2,88	3,02	11,75	2,38
E4	2,88	7,85	2,88	3,90	7,85	2,04
F3	2,88	13,09	2,88	3,13	13,09	1,73
F4	2,88	8,22	2,88	3,84	8,22	2,32
G2	2,88	13,62	2,88	3,14	13,62	1,65
G3	2,88	13,34	2,88	3,03	13,34	1,74
G4	2,88	7,99	2,88	3,65	7,99	1,66
G5	2,88	7,65	2,88	3,58	7,65	1,52
H2	2,88	12,70	2,88	2,89	12,70	1,85
H3	2,88	11,54	2,88	2,66	11,54	1,78
H4	2,88	7,29	2,88	3,41	7,29	1,60
H5	2,88	5,84	2,88	2,75	5,84	1,83

# ANEXO IV

# DISPOSICIÓN

# GENERAL



A

B

C

D

E

F

Departamento responsable <i>Dept. Tecnología Naval</i>	Referencia técnica <i>Luis Soto</i>	Tipo de documento <i>Distribución general</i>		Estado de documento <i>Editado</i>			
Propietario legal <i>Luis Soto</i>	Creado por: <i>Luis Soto</i>	Título, Título suplementario <i>Motora Caballero</i>					
	Aprobado por: <i>Dept. Tecn.Naval</i>						
		Rev.	Fecha de edición	Idioma	Hoja		
		2	28/08/2019	ESP	1		